

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**

Fakulta strojní

Katedra energetiky

## **Fotovoltaická elektrárna 100 kWp**

Photovoltaic Power Plant 100 kWp

Student:

Ing. Josef Velička

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Mojmír Vrtek, Ph.D.

OSTRAVA 2019

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra energetiky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Ing. Josef Velička**  
Studijní program: B3907 Energetika  
Studijní obor: 3907R012 Energetika 21.století  
Téma: Fotovoltaická elektrárna 100 kW<sub>p</sub>  
Photovoltaic Power Plant 100 kW<sub>p</sub>  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Navrhnete fotovoltaickou elektrárnu (FVE) o instalovaném výkonu 100 kW<sub>p</sub>.

Práce bude obsahovat:

1. Analýzu současného stavu a perspektivy využívání fotovoltaiky.
2. Návrh FVE.
3. Stanovení energetických zisků na základě klimatických údajů pro referenční rok pro Ostravu.
4. Porovnání získaných výsledků s alespoň dvěma SW výpočtovými nástroji pro hodnocení zisků FVE.
5. Vyhodnocení návrhu z ekonomického a environmentálního hlediska.
6. Grafickou část - schéma zapojení, dispoziční řešení.

Seznam doporučené odborné literatury:

KAMINSKÝ, J.; VRTEK, M. *Obnovitelné zdroje energie*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 1998. 102 s. ISBN 80-7078-445-8.

CIHELKA, J. *Solární tepelná technika*. Praha: Malina, 1994. 203 s. ISBN 80-900759-5-9.

TURNER, W. C. *Energy Management Handbook*. 3. vyd. Lilburn: The Fairmont Press, Inc., 1997. 400 s. ISBN 0-13-728098-X.


HALAHYJA, M.; VALÁŠEK, J. a kol. *Solárna energia a jej využitie*. Bratislava: ALFA, 1983. 304 s. *SOLARTEC s.r.o. Fotovoltaika a fotovoltaické systémy v podmínkách ČR a jejich navrhování* [online]. Praha: Česká energetická agentura, 2006 [cit. 2011-09-30]. 64 s. Dostupný na WWW: <[www.mpo-efekt.cz/dokument/98\\_8050.pdf](http://www.mpo-efekt.cz/dokument/98_8050.pdf)>.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Mojmír Vrtek, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019

  
doc. Ing. Stanislav Honus, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

#### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Metylovicích dne 20. 5. 2019

A handwritten signature in blue ink, reading "Josef Vukobrat", is written over a horizontal dotted line.

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § (60 Školní dílo),
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Metylovicích dne 20. 5. 2019



Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: Josef Velička

Adresa trvalého pobytu autora práce: Metylovice 157, 739 49

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VELIČKA, J. Fotovoltaická elektrárna 100 kWp: bakalářská práce.

Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2019, 53 s. Vedoucí práce: Vrtek, M.

Předkládaná bakalářská práce se zabývá využitím solární energie a principem její přeměny na elektrickou energii. V praktické části se věnuje návrhu FVE pomocí softwarových výpočetních nástrojů a porovnání vypočtených výsledků. Vhodnost realizace FVE v podmínkách České republiky je posouzena z ekonomického a ekologického hlediska.

**Klíčová slova:** energie, obnovitelné zdroje, fotovoltaický systém, fotovoltaická elektrárna, fotovoltaické panely

## ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

VELIČKA, J. Fotovoltaická elektrárna 100 kWp: Bachelor Thesis. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2019, 53 p. Thesis head: Vrtek, M.

This bachelor thesis is dealing with the use of solar energy and the principle of its conversion to electricity. In the practical part is devoted to the design of a PV using software of computational tools and the comparison of the calculated results. The appropriateness of the implementation of PV in the Czech republic is assessed from an economic and an ecological point of view.

**Keywords:** energy use, renewable sources of energy, solar power, photovoltaic system, photovoltaic power plant, photovoltaic panels

## Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	7
Úvod.....	8
1 Přehled současného stavu problematiky .....	10
1.1 Podstata přeměny slunečního záření na elektrickou energii .....	10
1.2 Solární záření .....	10
1.3 Princip činnosti FV článku .....	14
1.4 Typy fotovoltaických článků.....	16
1.5 Recyklace fotovoltaických článků .....	18
1.6 Druhy solárních elektráren .....	19
1.7 Elektrický měnič napětí – střídač .....	22
2 Výpočetní postupy stanovení produkce FVE .....	23
2.1 Postup podle ČSN EN 15316-4-6.....	23
2.2 Zjednodušená bilanční metoda .....	24
2.3 Počítačové bilanční metody.....	30
3 Popis provedených prací .....	31
3.1 Návrh FVE.....	31
3.2 Program PVGIS - Fotovoltaický GIS.....	34
3.3 Program PV*SOL .....	36
3.4 Program DEKSOFT FVE (Fotovoltaika) .....	39
4 Porovnání a zhodnocení vypočtených hodnot .....	42
5 Ekonomické vyhodnocení.....	44
6 Ekologické vyhodnocení .....	48
7 Závěr .....	49
8 Seznam použitých zdrojů.....	51
9 Seznam příloh .....	53

## **Seznam použitých značek a symbolů**

FVE     fotovoltaická elektrárna

FS      fotovoltaický systém

EE      elektrická energie

ČHMI   Český hydrometeorologický institut

## Úvod

Od devatenáctého století začala náš běžný život ovlivňovat elektrická energie a dnes si bez ní fungování domácnosti i ostatních částí společnosti nedovedeme představit. Při současném růstu naší populace a narůstající potřeby elektřiny jsme se dostali do stavu, kdy musíme uvažovat o budování alternativních zdrojů elektrické energie, protože začínáme pociťovat negativní vlastnosti využívání neobnovitelných zdrojů elektrické energie, a to hlavně využívání fosilních paliv, jako jsou uhlí, ropa a zemní plyn.

Fotovoltaické elektrárny patří k nejekologičtějším zdrojům elektrické energie. Kromě vlastní výroby fotovoltaických panelů a následně jejich likvidace a recyklace po dovršení jejich životnosti nijak nenarušují životní prostředí. Jsou bezhlučné, jen málo narušují ráz krajiny a další výhodou je jejich téměř bezúdržbový provoz. Nevýhodou fotovoltaiky je, že vyrobenou elektřinu můžeme využívat na přímo pouze ve dne a ve větší míře v letních měsících, tedy v době s vysokým slunečním svitem.

Výstavba solárních elektráren je v současné době velmi společensky diskutovaným problémem. V minulých letech se díky státní podpoře postavilo velké množství solárních elektráren, které byly velice výhodné díky podpoře na výkup vyrobené elektrické energie. Tato státní podpora (na vyrobenou elektřinu) se již FVE, které byly postavené po 1.1.2014, neposkytuje. V současné době se povolují instalace pouze na střechy objektů, a u dotační podpory na jejich instalaci je podmínka, že se většina vyrobené elektřiny využije pro vlastní spotřebu.

Úkolem této práce je porovnat návrhové výpočetní metody fotovoltaické elektrárny tak, aby obdržené výsledky co možná nejvíce realisticky odpovídaly skutečným dosaženým výsledkům. Tím můžeme optimalizovat přebytky energie dodávané do sítě a stanovit výkon elektrárny, která bude mít ekonomicky nejkratší návratnost.

V teoretické části práce jako první rozebírám teorii přeměny slunečního záření na elektrickou energii a přibližuji jednotlivé komponenty nutné k výstavbě sluneční



elektrárny. Je zde také popsána současná legislativa pro výstavbu a provoz slunečních elektráren.

V praktické části porovnávám výsledky jednotlivých SW výpočetních nástrojů a rozebírám jejich přednosti a nedostatky.

V praktické části se zabývám taktéž ekonomickou a ekologickou stránkou projektu. V této části porovnám tři navrhované možnosti a pomocí ekonomických kritérií zhodnotím návratnost investice.

# 1 Přehled současného stavu problematiky

## 1.1 Podstata přeměny slunečního záření na elektrickou energii

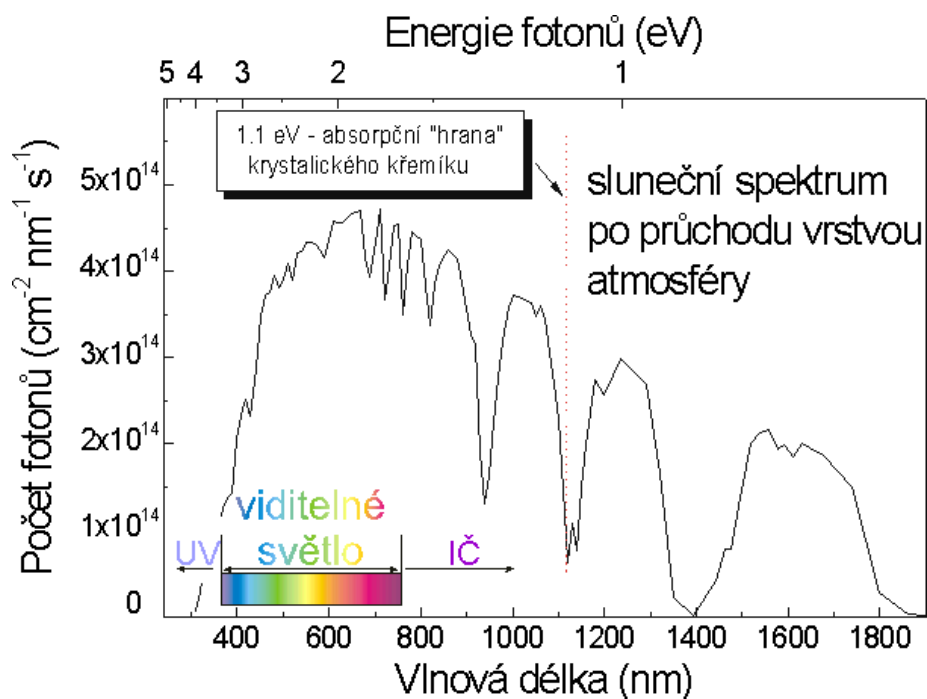
Fotovoltaika (fotovoltaické systémy) patří mezi skupinu obnovitelných zdrojů elektrické energie. Fotovoltaika je přímá metoda přeměny slunečního záření na elektrickou energii s využitím fotoelektrického jevu na polovodičových fotodiodách. Jednotlivé fotodiody tvoří fotovoltaické články, které jsou spojovány do větších celků - fotovoltaických panelů.

Fotovoltaický panel je schopen vyrábět elektrickou energii i bez přímého osvětlení pomocí tzv. difúzního záření (tj. při zatažené nebo oblačné obloze), které nad územím České republiky převládá.

## 1.2 Solární záření

Téměř většina energie slunce je vyzařovaná ve formě elektromagnetického záření, které je zdrojem veškerého života na zemi. Každou sekundu dopadá na osvětlenou část zeměkoule  $1,74 \cdot 10^{14}$  J zářivé energie, která se uvolní při termonukleárních reakcích. Solární konstanta je tok energie procházející plochou  $1 \text{ m}^2$ , kolmou na směr slunečních paprsků, ve střední vzdálenosti Země od Slunce, mimo zemskou atmosféru. Solární konstanta činí  $1373 \text{ W/m}^2$ . Slunce vyzařuje paprsky v širokém rozsahu spektra, které dělíme na:

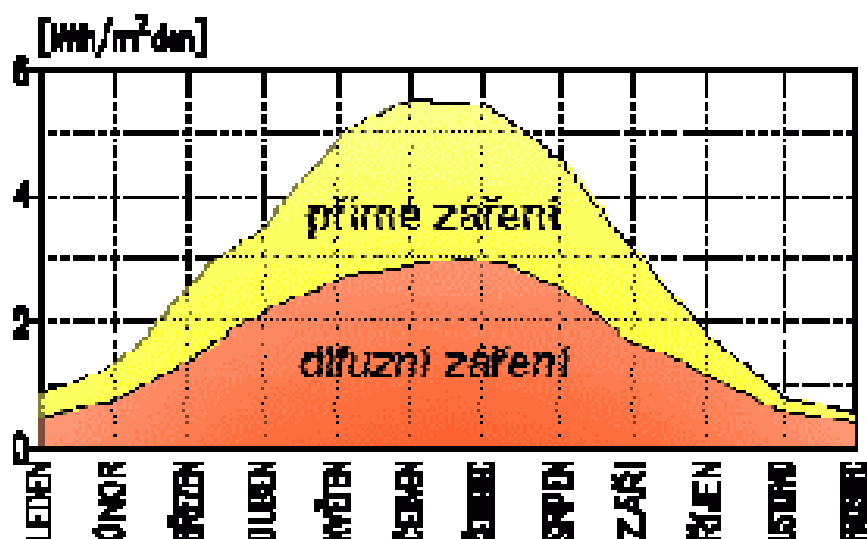
- Ultrafialové (vlnová délka menší než 400 nm)
- Infračervené (vlnová délka 760 nm - 1 mm)
- Viditelné (vlnová délka více než 400 - 750 nm) [2]



**Obrázek 1.1 - Energie fotonů [1]**

80% slunečního záření je odraženo zpátky do vesmíru a zbylých 20 % je atmosférou pohlceno. Největší pohlcení probíhá v polárních oblastech (záření proniká do atmosféry pod ostrým úhlem), nejméně pak v tropických oblastech. Na zemský povrch dopadá dvacet tisíckrát větší množství sluneční energie, než jsme schopni využít. Jedna se o čistou energii, kterou však nelze plně využít při nepříznivých klimatických podmínkách a vůbec v noci.

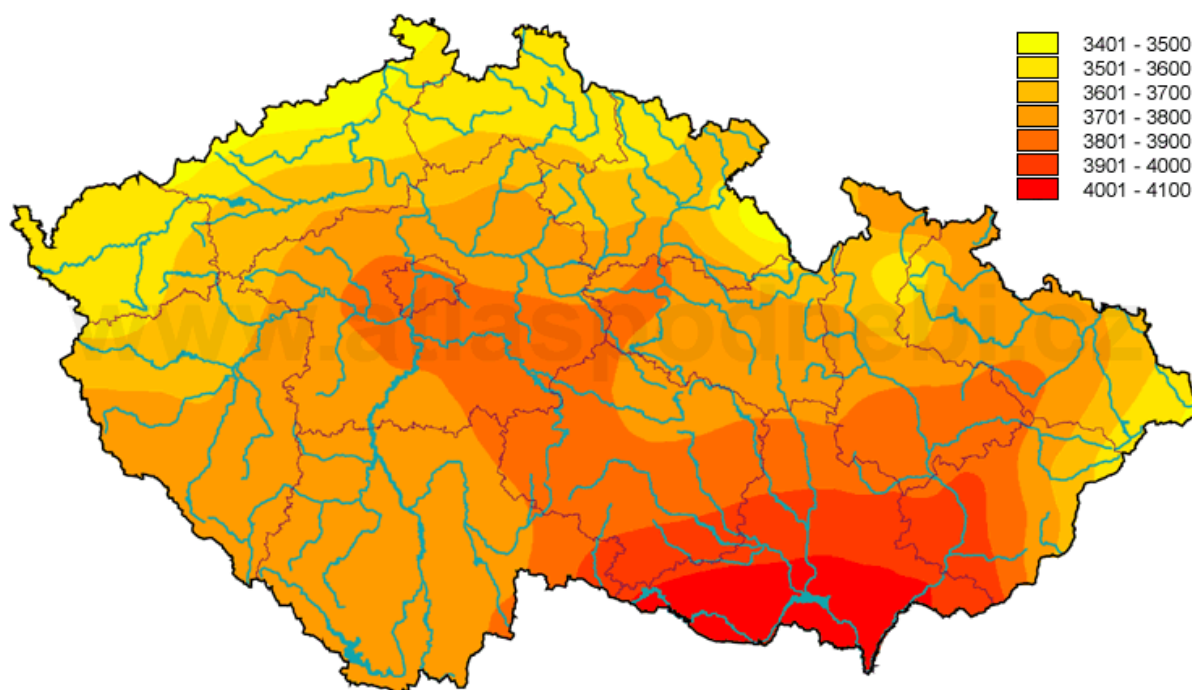
Globální sluneční záření se skládá z přímého a difuzního (viz obr. 2). Při jasné a bezmračné obloze dopadá největší část slunečního záření na Zemi, aniž by změnilo směr. Toto záření se nazývá přímé. Rozptylem přímého záření v mracích a na částech v atmosféře vzniká záření difuzní, které přichází na zemský povrch ze všech směrů. Na povrch země dopadne maximálně  $1000 \text{ W/m}^2$ , protože je část sluneční energie pohlcena nebo odražena. Množství využitelné energie závisí na ročním období, zeměpisné šířce, oblačnosti, lokálních podmínkách a úhlu ozáření. Solární energii lze využívat ve všech zeměpisných šířkách, její efektivita však směrem k pólům klesá. [2,4]



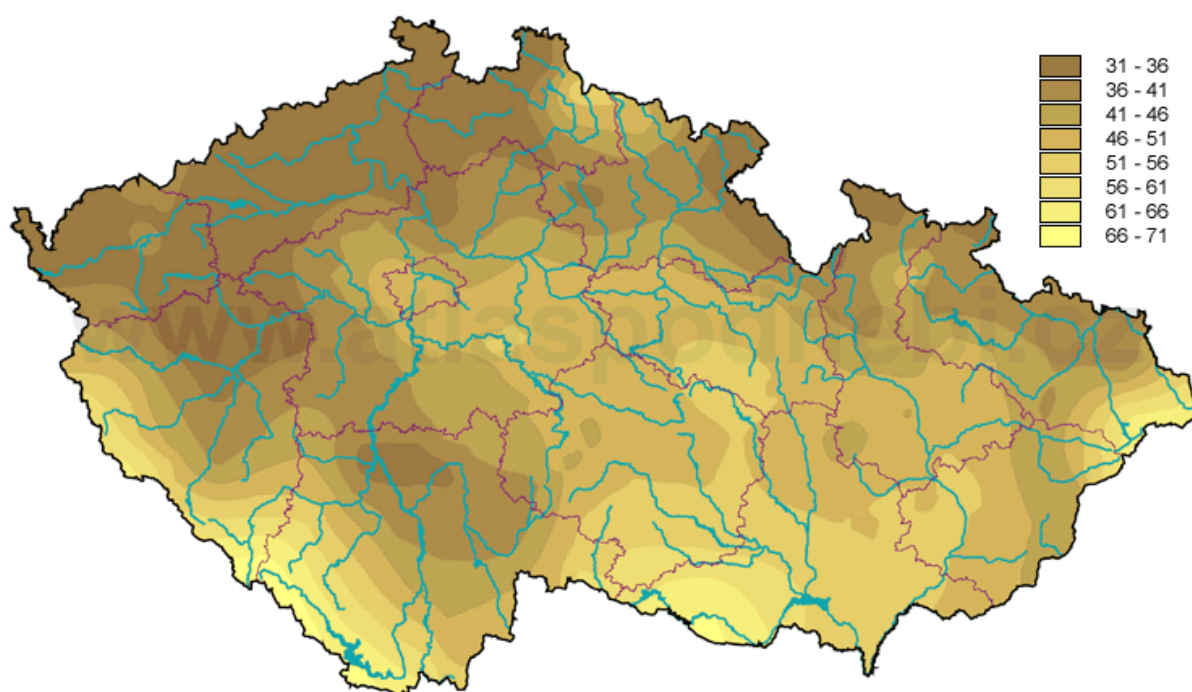
Obrázek 1.2 - Přímé a difúzní záření [2]

### ***Podmínky v České republice***

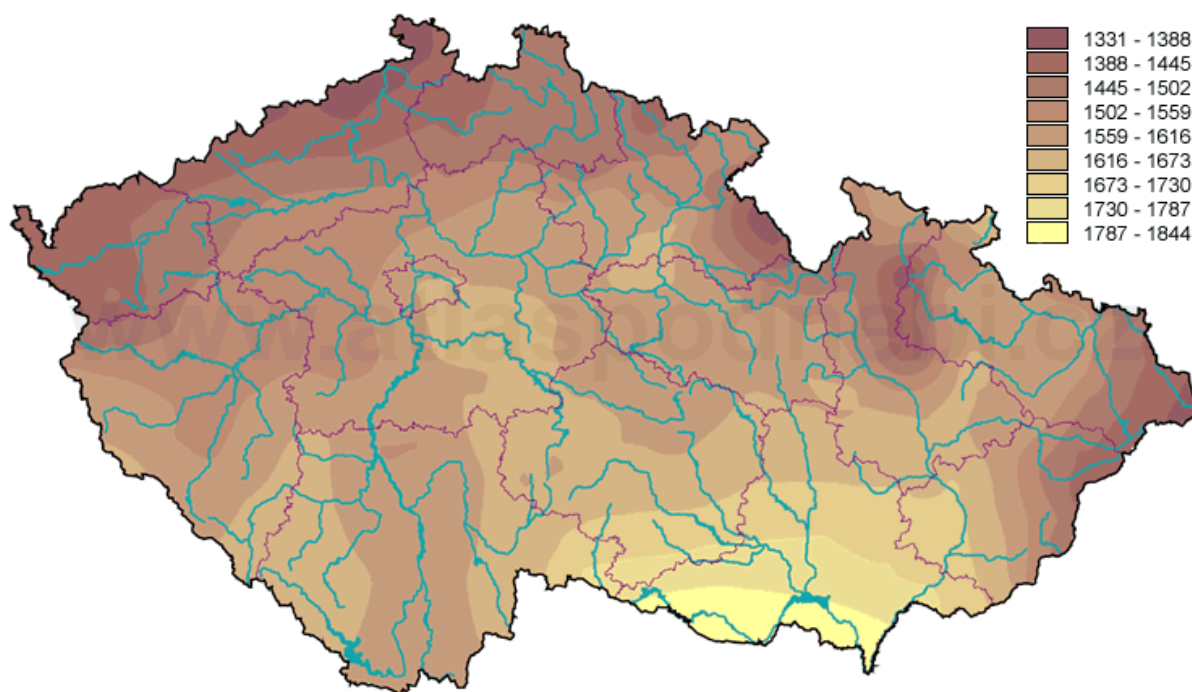
V České republice jsou podmínky pro využití sluneční energie celkem příznivé. Nejvíce sluneční energie dopadá na jihovýchod a nejméně na severozápad. Průměrná hodnota počtu hodin slunečního svitu v ČR je 1400 – 1800 h/rok. Mezi jednotlivými regiony je množství slunečního svitu rozdílné. V nížinných oblastech jižní Moravy dosahuje doba svitu až 2000 h/rok a na horách 1600 h/rok. V místech se silně znečištěnou atmosférou a častými inverzemi klesá sluneční záření o 5-10 %. Na 1 m<sup>2</sup> dopadne v ČR přibližně 800 – 1250 kWh energie za rok. [5]



Obrázek 1.3 - Průměrný roční úhrn globálního záření [MJ/m²] [6]



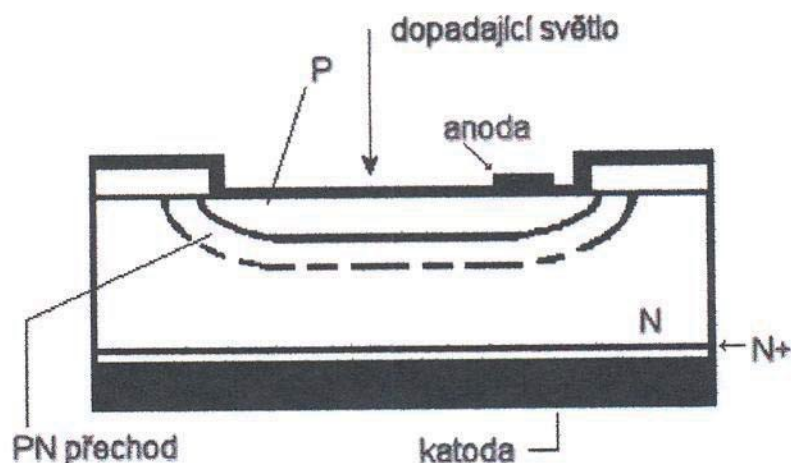
Obrázek 1.4 - Průměrný roční počet jasných dnů [6]



**Obrázek 1.5 - Průměrný roční úhrn doby trvání slunečního svitu [6]**

### 1.3 Princip činnosti FV článku

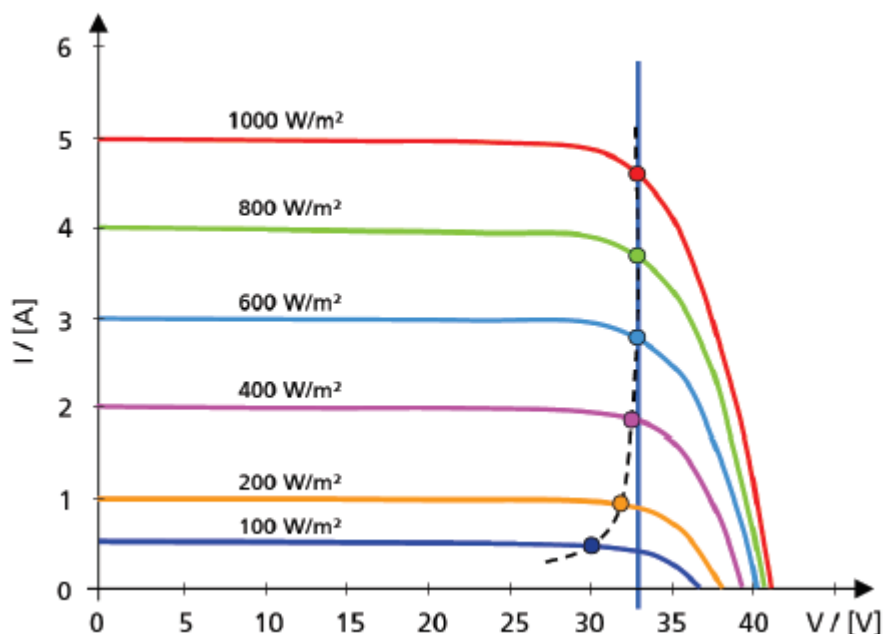
Obecně fotovoltaický článek je velkoplošná polovodičová součástka (fotodioda), která má schopnost pomoci fotovoltaického jevu přeměňovat světlo na elektrickou energii. Fotovoltaický jev spočívá v uvolňování elektronů z látky v důsledku absorbování elektromagnetického záření (světla). Uvolňované elektrony jsou nazývány fotoelektrony. Nejspolehlivější fotodiody jsou křemíkové. Struktura fotodiody je patrna z obrázku 1.6. Citlivou vrstvou tvoří vrstva P, na které se pomocí dopadajících fotonů uvolní elektrony. Vznikne pár elektron – díra. Elektrony přechází do vrstvy N a díry přechází do vrstvy P. Na PN přechodu vzniká rozdíl potenciálu, to znamená vznik napětí. Součástí těchto přechodových vrstev jsou elektrody, horní elektroda je anoda tvořena mřížkou, aby mohly fotony proniknout k polovodiči, tedy k vrstvě P. Ze spodní strany je umístěna záporná elektroda, tedy katoda v podobě plného kovu.



**Obrázek 1.6 - Struktura fotodiody [12]**

### ***Elektrické vlastnosti fotovoltaických článků***

Pro jakékoliv praktické využití libovolných zdrojů elektrické energie jsou důležité 3 elektrické veličiny - elektrické napětí, elektrický proud a elektrický odpor. U fotovoltaických článků je napětí dáno použitým typem polovodiče a je hlavně ovlivňováno teplotou modulu. Při nízkých teplotách napětí začne narůstat, např. v zimě se hodnota napětí může zvětšit o 20 % nad jmenovitou hodnotu. Proud je přímo závislý na intenzitě ozáření modulu. Sníží-li se intenzita ozáření na polovinu i proud klesne na polovinu. Zpravidla se článek charakterizuje V-A charakteristikou, tj. závislostí elektrického proudu na elektrickém napětí (obr. 1.7). V praxi nás, ale především zajímá elektrický výkon článku, tj. součin elektrického napětí a proudu. Při daných podmínkách (osvětlení, teplota) existuje právě jedna hodnota elektrického proudu a napětí, při níž je elektrický výkon maximální. Fotovoltaický článek by měl v tomto optimálním bodě pracovat z důvodu maximální účinnosti. U fotovoltaických článků se udává ještě jeden důležitý parametr, a to je činitel plnění FF (Fill Factor), což je podíl maximálního výkonu k teoretickému, neboli součinu proudu nakrátko a napětí naprázdno. [7]



**Obrázek 1.7: VA charakteristiky FV\_ pro různé intenzity slunečního záření s vyznačeným bodem maximálního výkonu [8]**

## 1.4 Typy fotovoltaických článků

### Monokrystalické články

Články tohoto typu se skládají z jediného krystalu. Výroba monokrystalických ingotů probíhá tzv. Czochralskiho metodou. Do taveniny o teplotě cca 1 415 °C se ponoří malý monokrystal jako zárodek. Ten se velmi pomalu z taveniny vytahuje a přitom se nechává otáčet kolem podélné osy. Celý proces probíhá v inertní atmosféře za sníženého tlaku. [5] Poté se ingot nařeže na destičky o tloušťce 0,3 mm. Tento typ je v důsledku toho, že je vyroben z jediného krystalu zbarven do tmavě modré až černé barvy. Monokrystalické články dosahují účinnosti až 21 %. [9]

### Polykrystalické články

Tento typ je na výrobu levnější než monokrystalický. Vyrábí se metodou blokového lití, kdy se křemík ve vakuu zahřeje na 1 500 °C a ochlazuje se až do bodu tání. Tím vzniknou bloky křemíku, které se pak následně rozřezávají na tyče a poté na destičky.



Zbarvení mají modře se třpytící krystalickou strukturu. Účinnost těchto článků se pohybuje v rozmezí mezi 13 až 16 %. [9]

### **Tenkovrstvé články**

Budoucností solární techniky jsou tenkovrstvé články. Jejich výroba je podstatně levnější než výroba krystalických článků, tudíž i jejich návratnost je rychlejší. Podíl tenkovrstvých modulů se na trhu neustále zvětšuje. Využití tohoto typu modulů je velmi široké. Jejich hlavní výhodou je flexibilita, možnost aplikace na různé plochy, díky možnosti průhlednosti materiálu instalace na okna a stěny výškových budov. Hlavní výhodou je snadná výroba oproti klasické technologii křemíkových destiček. V současné době jsou instalace tenkovrstvých a klasických krystalických srovnatelně finančně srovnatelné. U větších výkonů již tenkovrstvé technologie vyjdou v návratnosti lépe než krystalické. Tenkovrstvé články se častou používají v historických částech měst, kdy je požadavek na nenarušení klasického vzhledu střechy.

Výroba tenkovrstvých článků je odlišná od výroby krystalických. Na různé materiály (sklo, plast, aj.) se nanáší vrstva tenká několik mikrometrů při teplotách v rozmezí 200 °C až 500 °C. Oproti krystalickým článkům je také rozdílný systém elektrického spojení. U tenkovrstvých panelů je elektrické propojení integrováno již do výroby článků. [7] Nevýhodou tenkovrstvých článků je jejich menší účinnost, která se pohybuje mezi 6 - 10 %.

### **Amorfní křemíkové články**

První články tohoto typu byly vyvinuty v roce 1974. Ve velké míře se začaly používat v kalkulátorech, hodinkách atd. Amorfní křemík netvoří pravidelnou krystalickou strukturu, nýbrž neuspořádanou síť. Vyrábí se chemickým odlučováním při teplotách jen 200 °C z plynného silanu. Tyto články mají malou účinnost. Většinou se pohybuje mezi 5 - 10 %. V prvním roce tato účinnost ještě výrazně klesá z důvodu degradace světlem. Po tomto procesu se účinnost udrží na stejné hladině.

## Další druhy článků

Výrobci solárních článků v posledních letech přicházejí na trh s novými technologiemi výroby článků. Jendou z nich jsou mikromorfní články, které jsou kombinací mikrokrystallického a amorfního křemíku v tandemových článcích. Tyto články mají účinnost až 11 %. Zde se ještě musí dořešit problémy při nanášení kontinuálních vrstev.

Velký rozmach zažívá v dnešní době technologie CIS založená na dvojselenidu mědi-india. Tyto články dosahují nejvyšších účinností u tenkovrstvých technologií, ale je u nich problém se stabilitou v horkém a vlhkém prostředí.

Další technologií jsou články na bázi teluridu kadmennatého. Polovodičové vrstvy se nanášejí při 700 °C ve vakuu. Tyto moduly se především objevují u velkých instalací. Jejich účinnost je 11 % a maximální systémové napětí mají 1 000 V. [7]

### 1.5 Recyklace fotovoltaických článků

Podle zákona č. 229/2014 Sb. [10] platí pro recyklaci fotovoltaických panelů následující podmínky:

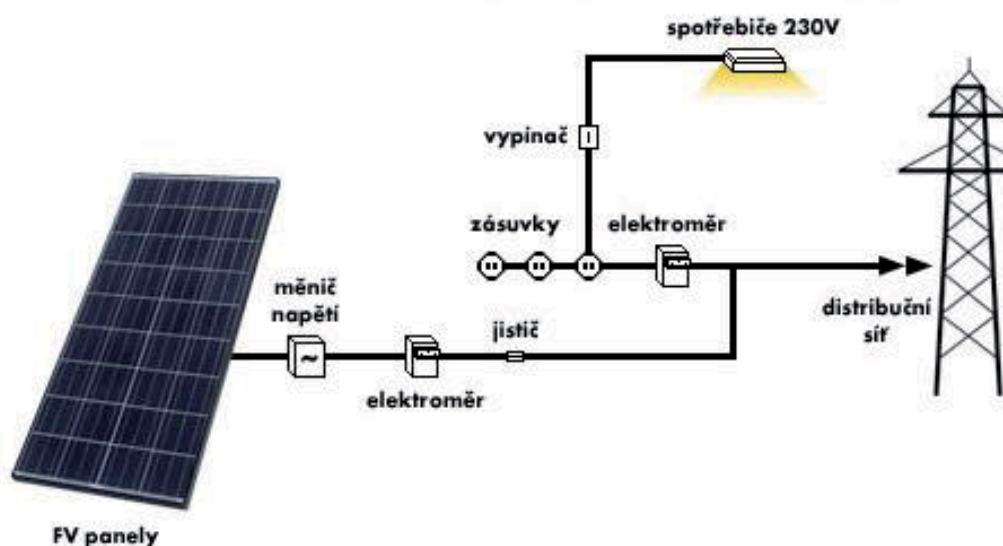
*U fotovoltaických panelů uvedených na trh po 1. lednu 2013 zodpovídá za financování výrobce, podmínky jsou v podstatě shodné s financováním nakládání s elektrozařízením pocházejícím z domácností včetně možnosti volby individuálního nebo kolektivního systému, přičemž ve druhém případě výrobce nemusí poskytovat finanční záruku prokazující, že nakládání s elektroodpadem ze solárních panelů bude finančně zajištěno. [9]*

## 1.6 Druhy solárních elektráren

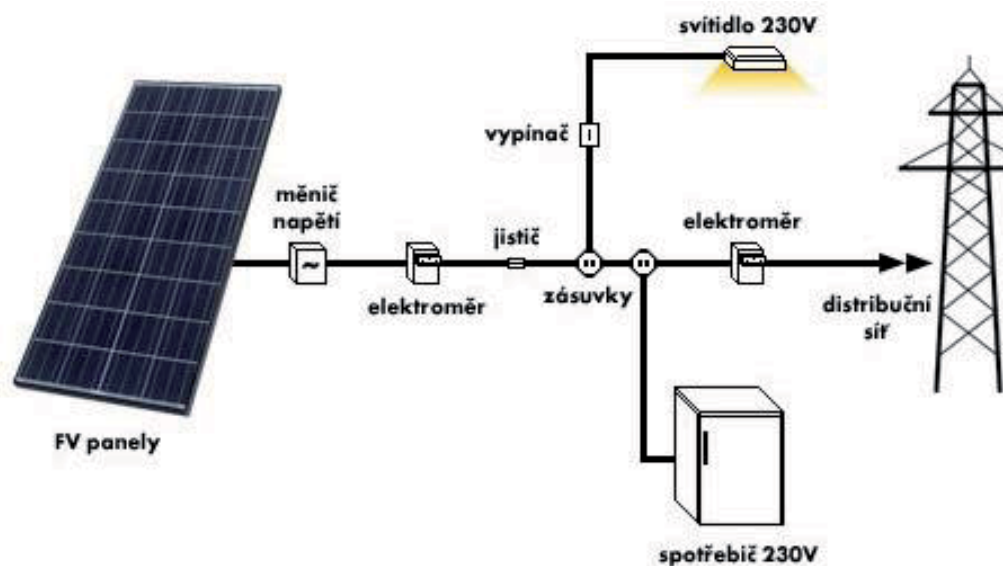
Solární instalace se dělí na dvě základní. Systémy připojené k síti (on-grid) a ostrovní systémy (off-grid). Ostrovní systémy se dělí dále na systémy bez podpory dalšího zdroje výroby elektřiny a s podporou například diesellového agregátu.

### Síťové systémy (on-grid)

Tyto systémy se používají nejvíce při instalacích v oblastech s hustou sítí elektrické rozvodné soustavy. Pro tyto instalace je nutné získat povolení připojení k síti od distribuční společnosti. Dříve se tyto systémy instalovaly volných prostranstvích. Nyní se v České republice povolují většinou jenom instalace na střechy rodinných domů a průmyslových závodů (maximální instalovaný výkon v dotačním programu OP PIK je 100 kWp).



Obrázek 1.8 - Systém s prodejem energie [11]

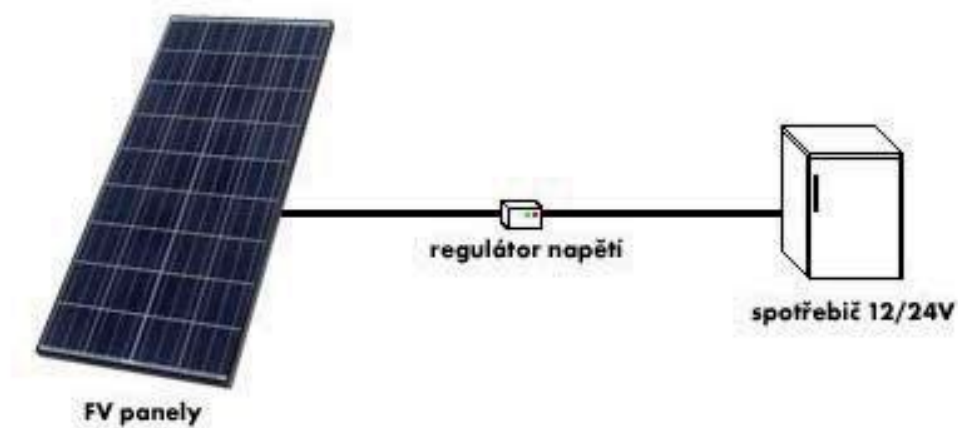


**Obrázek 1.9 - Systém s prodejem přebytků energie [11]**

### **Ostrovní systémy (off-grid)**

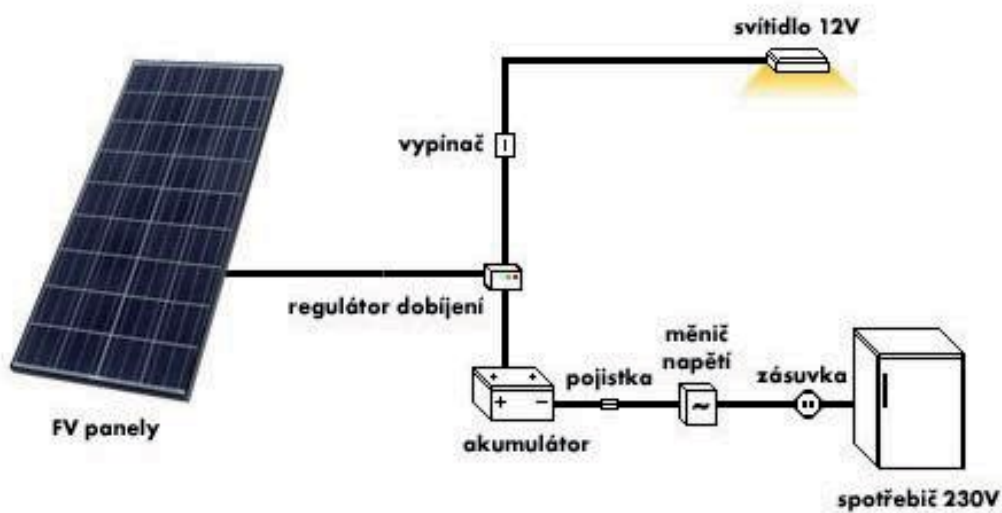
Tyto systémy se používají na místech, kde není k dispozici připojení k rozvodné síti. Ostrovní systémy se využívají především tam, kde by bylo z hlediska finanční a technické náročnosti složité vybudovat elektrickou přípojku. [7]

Systém s přímým napájením je takový, kde je spotřebič připojen přímo na fotovoltaický panel či panely. Zapojení se nachází na obrázku 1.10. Výhodou tohoto systému je jeho jednoduchost a nízké pořizovací náklady. Jeho nevýhody spočívají v tom, že tento systém je možné použít jen v době dostatečné intenzity slunečního záření. Lze ho použít u zařízení, u kterých nevádí možný výpadek při nedostatečném slunečním záření. Použití tedy nachází u čerpání vody v závlahovém systému, napájení ventilátorů odvětrání, atd.



**Obrázek 1.10 - Systém s přímým napájením [11]**

Z důvodu výroby fotovoltaické elektrárny pouze přes den jsou tyto systémy dovybaveny akumulátory elektrické energie a často také dalším zdrojem elektrické energie. Nejčastěji jsou použity dieselové agregáty, méně často je FVE instalována v kombinaci s dalším obnovitelným zdrojem, například vodní nebo větrnou elektrárnou.



**Obrázek 1.11 - Systém zapojení off-grid s akumulátory [11]**

## 1.7 Elektrický měnič napětí – střídač

Fotovoltaické panely generují stejnosměrný proud. Pokud chceme elektřinu dodávat do sítě nebo spotřebovat v objektu, je potřeba změnit stejnosměrný proud na střídavý a napětí upravit tak, aby odpovídalo napětí sítě nebo přístrojů napájených z fotovoltaické elektrárny.

Podle použití dělíme měniče na:

- ostrovní
- síťové

U síťových měničů je velmi důležité, aby při výpadku rozvodné sítě došlo také k odpojení měničů. Tyto měniče si sami synchronizují kmitočet podle kmitočtu rozvodné sítě.

Dále se dělí měniče na:

- transformátorové
- beztransformátorové

Transformátorové měniče se používají u větších instalací fotovoltaiky. Tento měnič zajistí galvanické oddělení od sítě. Pro střešní instalace na rodinných domech se používají menší a levnější beztransformátorové měniče.

Posledním dělením je dělení podle výkonu:

- modulové
- řetězcové
- centrální

Pro střešní instalace se nejčastěji používají centrální měniče, které jsou levnější oproti dalším dvěma typům, mají ale horší sledování bodu maxima. [13]

## 2 Výpočetní postupy stanovení produkce FVE

### 2.1 Postup podle ČSN EN 15316-4-6

V ČR je v rámci souboru norem pro energetické hodnocení budov zavedena norma ČSN EN 15316-4-6 [15], která stanovuje roční produkci elektrické energie fotovoltaickým systémem pouze na základě jeho špičkového výkonu, bez ohledu na reálné provozní vlivy pro konkrétní použité fotovoltaické moduly a další prvky systému.

Elektrická energie dodaná fotovoltaickým systémem  $E_{FV,sys}$  [kWh/rok], se stanoví jako

$$E_{FV,sys} = \frac{H_{t,rok} \cdot P_{pk} \cdot f_{perf}}{G_{ref}} \quad (1)$$

kde je

$H_{t,rok}$  roční dávka slunečního ozáření [kWh/m<sup>2</sup>.rok] dopadající na fotovoltaický systém

$f_{perf}$  činitel výkonnosti fotovoltaického systému [–],

$G_{ref}$  referenční sluneční ozáření, které je rovné 1 kW/m<sup>2</sup>.

Špičkový výkon fotovoltaického systému  $P_{pk}$  se získá z parametrů FV pole za normových zkušebních podmínek (referenční zkušební hodnoty teploty článku 25 °C, ozáření v rovině  $G_{ref} = 1 \text{ kW/m}^2$ , referenční sluneční spektrum AM 1,5 při zkoušce FV modulu).

Pokud  $P_{pk}$  [kW] není k dispozici, může být vypočten orientačně podle vztahu [15]:

$$P_{pk} = K_{pk} \cdot A_{FV} \quad [\text{kW}] \quad (2)$$

kde je

$K_{pk}$  součinitel špičkového výkonu [kW/m<sup>2</sup>] závisející na druhu technologie

fotovoltaického modulu (informativní hodnoty jsou uvedeny v tab. 2.1, u krystalických technologií se uvažuje minimální faktor zaplnění apertury článku 80 %),

$A_{FV}$  celková činná plocha [m<sup>2</sup>] všech fotovoltaických modulů (bez rámu).

**Tabulka 2.1 Informativní hodnoty součinitele špičkového výkonu [14]**

Druh fotovoltaického modulu	$K_{pk}$ [kW/m <sup>2</sup> ]
Monokrystalický křemík	0,12 až 0,18
Multikrystalický křemík	0,10 až 0,16
Tenkvrstvý amorfni křemík	0,04 až 0,08
Ostatní tenkvrstvé	0,035
Tenkvrstvý CIGS (měď-indium-galium-diselenid)	0,105
Tenkvrstvý CdTe (kadmium-telurid)	0,095

Součinitel špičkového výkonu je tedy referenční účinností FV modulu.

Činitel výkonnosti systému  $f_{perf}$  zohledňuje výkonnost fotovoltaické instalace integrované do budovy v závislosti na:

- soustavě přeměny ze stejnosměrného proudu na střídavý proud (paušálně),
- skutečné provozní teplotě fotovoltaických modulů (paušálně),
- integraci fotovoltaických modulů do budovy (rozlišeno v tab. 2.2).

**Tabulka 2.2 - Informativní hodnoty činitele výkonnosti systému [14]**

Druh integrace fotovoltaického modulu do budovy	$f_{perf}$ [-]
Nevětrané moduly	0,70
Mírně větrané moduly	0,75
Silně větrané moduly nebo nuceně větrané moduly	0,80

## 2.2 Zjednodušená bilanční metoda

Zjednodušená bilanční metoda nepracuje s voltampérovou charakteristikou jako podrobné matematické modely FV modulů. Pro výpočet se jako základní údaje využívají referenční účinnost modulů  $\eta_{ref}$  [%], instalovaný špičkový výkon  $P_{pk}$  [kW], případně činná plocha FV modulů  $A_{FV}$  [m<sup>2</sup>]. Pro zohlednění vlivu provozních podmínek na účinnost modulů je však nutné použít i další parametry, které v technických listech



udává výrobce, jako je teplotní výkonový součinitel  $\gamma$  [%/K], jmenovitá provozní teplota článku NOCT a pokles účinnosti s poklesem slunečního ozáření  $\Delta\eta_G$  [%].

Účinnost FV modulu závisí na teplotě FV článků. S rostoucí teplotou se účinnost FV modulu snižuje podle lineárního vztahu [14]

$$\eta_{FV,t} = \eta_{ref} \cdot \left( 1 + \frac{\gamma}{100} \cdot (t_{FV} - t_{ref}) \right) \quad (3)$$

kde je

$\eta_{ref}$  - referenční účinnost [%] při normových zkušebních podmínkách (1000 W/m<sup>2</sup>, 25 °C),

$t_{FV}$  - teplota fotovoltaického článku [°C],

$t_{ref}$  - referenční teplota článku 25 °C,

$\gamma$  - teplotní součinitel výkonu [%/K] pro daný modul.

Výrobce v podkladech k FV modulům uvádí výkonový teplotní součinitel  $\gamma$  jako procentní snížení výkonu modulu vztahované na 1 K zvýšení teploty oproti referenční teplotě článku. Hodnota součinitele  $\gamma$  je záporná.

Teplotu FV článku v provozu je možné zjistit s využitím tzv. jmenovité provozní teploty článku NOCT. Tu udává výrobce pro definované provozní podmínky, odlišné od normových zkušebních: sluneční ozáření  $G = 800$  W/m<sup>2</sup>, teplota okolního vzduchu  $t_e = 20$  °C, rychlost větru 1 m/s a stav bez odběru elektrické energie z FV článku (otevřený obvod).

Účinnost FV modulu závisí obecně také na úrovni slunečního ozáření  $G$ . S výjimkou tenkovrstvých (např. CdTe) modulů se účinnost FV modulů s klesajícím slunečním ozářením snižuje přibližně logaritmicky podle vztahu [14]

$$\eta_{FV,G} = \eta_{ref} \cdot \left( 1 + k \cdot \ln \frac{G}{G_{ref}} \right) \quad (4)$$

kde je

$\eta_{ref}$  referenční účinnost [%] při normových zkušebních podmínkách,

$G$  sluneční ozáření pro stanovení poklesu účinnosti, zpravidla  $G = 200$  W/m<sup>2</sup>,

$G_{ref}$  referenční ozáření  $G_{ref} = 1000$  W/m<sup>2</sup>,

$k$  součinitel pro daný modul [–].

Výrobce v technické specifikaci k FV modulům zpravidla uvádí hodnotu relativního snížení účinnosti  $\Delta\eta_G$  z 1000 W/m<sup>2</sup> na 200 W/m<sup>2</sup>. Hodnota  $\Delta\eta_G$  se uvádí jako záporná. Z této hodnoty je pak možné vyčíslit součinitel  $k$  a s jeho pomocí pak přepočítat účinnost na jiné podmínky ozáření. Hodnota  $k$  se uvádí ve výpočtech jako kladná hodnota.

Celkovou měsíční účinnost modulu  $\eta_{FV}$  [%] lze stanovit použitím korigovaných účinností ze vztahů (3) a (4) jako [14]

$$\eta_{FV} = \frac{\eta_{FV,t} \cdot \eta_{FV,G}}{\eta_{ref}} \quad (5)$$

Měsíční produkci elektrické energie FV systémem  $E_{FV,sys}$  [kWh/měs] lze stanovit na základě měsíčních klimatických podmínek a předpokládaných elektrických ztrát z celkové měsíční účinnosti FV modulu podle vztahu

$$E_{FV,sys} = 0,9 \cdot H_T \cdot A_{FV} \cdot \left(1 - \frac{p}{100}\right) = 0,9 \cdot \frac{P_{pk}}{G_{ref}} \cdot H_T \cdot \frac{\eta_{FV}}{\eta_{ref}} \cdot \left(1 - \frac{p}{100}\right) \quad (6)$$

kde je

$H_T$  měsíční dávka slunečního ozáření [kWh/m<sup>2</sup>.měs],

$A_{FV}$  činná plocha instalovaných FV modulů [m<sup>2</sup>],

$P_{pk}$  špičkový výkon instalovaných modulů [kW],

$\eta_{FV}$  měsíční účinnost modulů [%],

$\eta_{ref}$  referenční účinnost modulů [%],

$G_{ref}$  referenční sluneční ozáření rovné 1 kW/m<sup>2</sup>,

$p$  srážka vlivem elektrických ztrát [%].

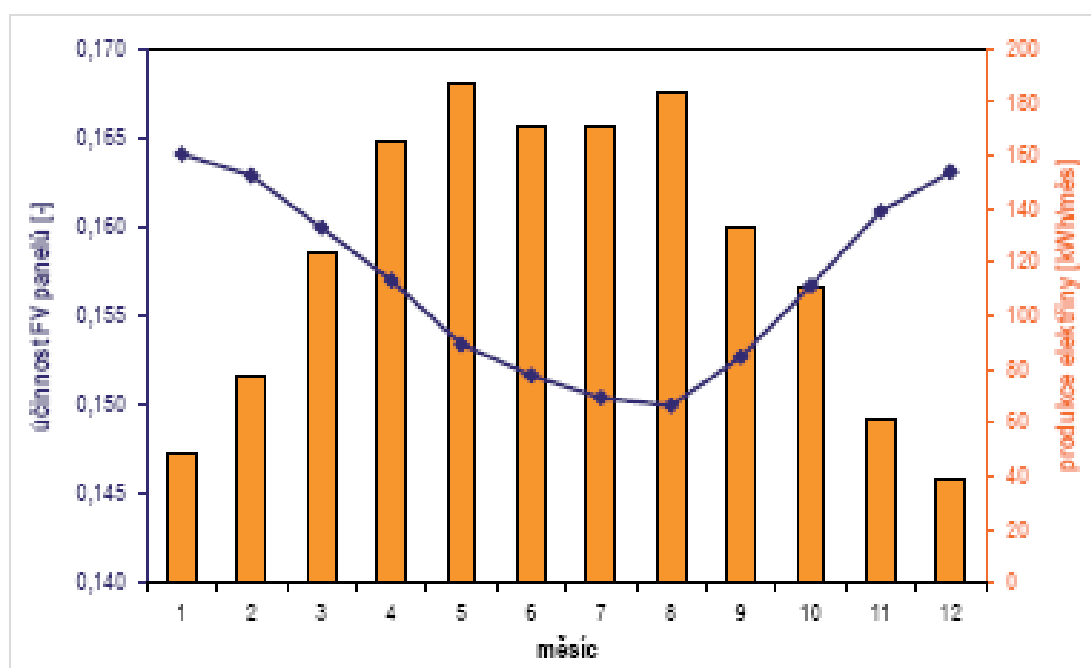
Elektrické ztráty rozvodu v budově je možné zjednodušeně uvažovat následovně: ztráty na DC vedení 2 %, ztráty na měniči a sledovači výkonového maxima okolo 5 % a ztráty na AC vedení cca 1 %. Optické ztráty vlivem nekolmého úhlu dopadu slunečního záření během roku na FV moduly jsou v rovnici zohledněny konstantou 0,9.

## Porovnání výpočtu FV systému

V následujícím příkladu jsou vypočteny roční přínosy FV systému pro jednotlivé technologie při stejné činné ploše modulů  $10 \text{ m}^2$ . [14] Systémové ztráty jsou uvažovány na úrovni 8 %. Parametry, které vstupují do výpočtu, byly převzaty z technických listů konkrétních FV modulů a uvedeny souhrnně v tab. 3. Prezentované výsledky byly stanoveny výpočtem navrženou zjednodušenou bilanční metodou pro klimatické údaje v souladu s TNI 73 0331. [16]

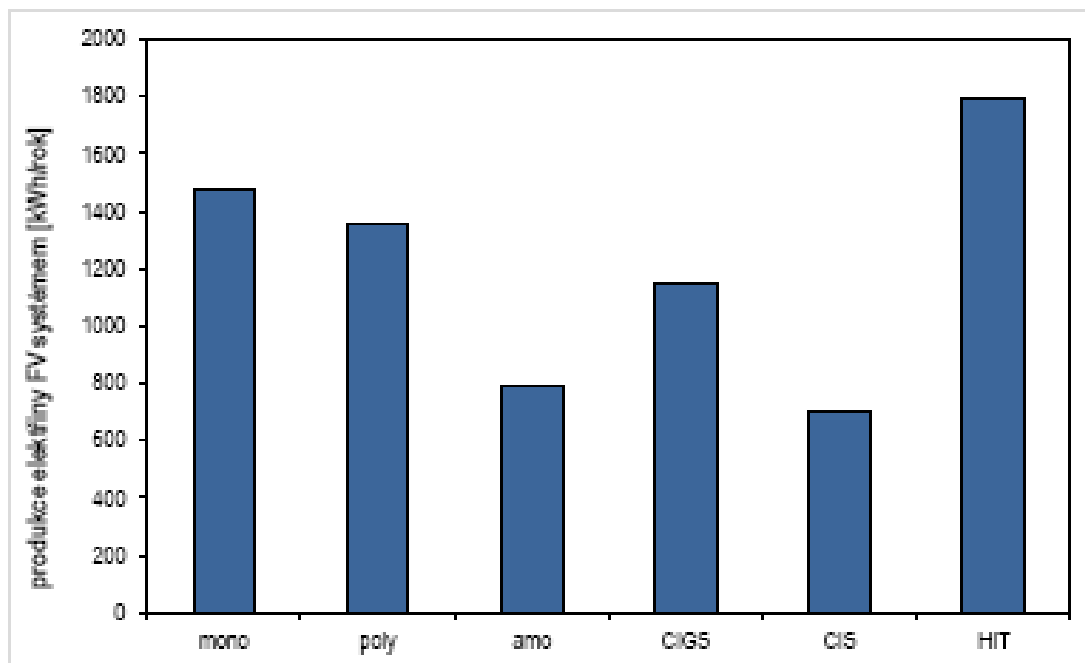
**Tab. 2.3 - Parametry konkrétních vybraných FV modulů jednotlivých technologií [14]**

Fotovoltaický modul	$\eta_{\text{ref}}$ [%]	$\gamma$ [%/K]	$NOCT$ [°C]	$\Delta\eta_G$ [%]
Monokrystalický křemík (mono)	15,9	-0,44	44,7	4,0
Polykrystalický křemík (poly)	14,8	-0,46	45,0	6,6
Tenkvrstvý amorfni křemík (amo)	8,5	-0,24	46,0	2,6
Tenkvrstvý CIGS	12,6	-0,38	51,0	4,0
Tenkvrstvý CIS	7,6	-0,35	47,0	2,0
HIT technologie	19,0	-0,30	44,0	0,9



**Obr. 2.1 - Měsíční balance FV systému s polykrystalickými moduly o ploše  $10 \text{ m}^2$  [14]**

V grafu na obr. 2.1 jsou uvedeny měsíční výsledky produkce elektrické energie celým FV systémem pro konkrétní technologii monokrystalických FV modulů o ploše 10 m<sup>2</sup>. Ve stejném grafu je zobrazen i průběh účinnosti samotných FV modulů během jednotlivých měsíců. Je patrné, že účinnost se během roku mění, v letním období je nejnižší s ohledem na vysokou provozní teplotu panelů. V zimním období je naopak účinnost nejvyšší.



**Obrázek 2.2 - Porovnání použití FV technologií [14]**

Na obr. 2.2 je srovnána roční produkce FV systému o ploše 10 m<sup>2</sup> vybaveného různými fotovoltaickými technologiemi uvedenými v tab. 2.3. V tab. 2.4 jsou kromě roční produkce FV systému  $E_{\text{sys}}$  uvedeny také jeho špičkový výkon  $P_{\text{pk}}$ , roční účinnost systému  $\eta_{\text{sys}}$  a také poměr celoroční účinnosti k referenční účinnosti použitého panelu dané FV technologie, což je ve své podstatě činitel výkonnosti systému  $f_{\text{perf}}$  uváděný normou ČSN EN 15316-4-6.

**Tabulka 2.4 - Výsledky výpočtu zjednodušenou bilanční metodou pro různé FV technologie [14]**

Fotovoltaický modul	$P_{pk}$ [kW]	$E_{FV,sys}$ [kWh/rok]	$\eta_{sys}$ [%]	$f_{perf}$ [-]
Monokrystalický křemík	1,59	1471	12,8	0,81
Polykrystalický křemík	1,48	1351	11,8	0,80
Tenkvrstvý amorfni křemík	0,85	791	6,9	0,81
Tenkvrstvý CIGS	1,26	1149	10,0	0,80
Tenkvrstvý CIS	0,76	704	6,1	0,81
HIT technologie	1,90	1791	15,6	0,82

Z výsledků uvedených v tab. 2.4 je patrné, že činitel výkonnosti systému pro různé FV technologie se v podstatě pohybuje v rozmezí hodnot 0,80 až 0,82 při uvažování FV modulů na střeše budovy vystavených působení větru (silně větrané moduly). To jsou v podstatě shodné hodnoty s údajem uvedeným v tab. 2.2. Na rozdíl od výpočtu ČSN EN 15316-4-6 lze však zjednodušenou bilanční metodou stanovit jak měsíční produkci, tak měsíční účinnost konkrétního použitého modulu a případně zohlednit účinnosti či ztráty dalších prvků FV systému. [14]

Pro výpočet fotovoltaických systémů v rámci hodnocení energetické náročnosti budov je možné použít velmi jednoduchou metodu podle normy ČSN EN 15316-4-6. Metoda má řadu nevýhod a pro konkrétní FV systém s konkrétními FV moduly je vhodnější použít podrobnější výpočet na měsíční bázi, tzv. zjednodušenou bilanční metodu. Výsledky potvrzují vhodnost ročního výpočtu podle normy, avšak zároveň ukazují možnost podrobnějšího srovnání technologií v měsíčním rozlišení, které je potřebné v případě hodnocení energetické náročnosti budov. [14]

### **2.3 Počítačové bilanční metody**

Z výše uvedených výpočtů a rozborů je možno rovněž konstatovat, že měsíční rozlišení výpočtu je vhodné pro hodnocení energetické náročnosti budovy, avšak z hlediska navrhování FVE (zvláště těch větších) je tento měsíční interval nedostatečný. Proto vznikla celá řada počítačových aplikací, které výpočet provádějí v kroku hodinovém nebo i kratším. Tyto programy počítají v každém kroku okamžitou (statistickou) bilanci slunečního záření a okamžitými parametry fotovoltaických článků a dalšího příslušenství FVE.

Okamžitou výrobu je zde možno porovnat s okamžitou spotřebou, kterou může reprezentovat skutečné hodnoty naměřené v krátkých intervalech (např. 15 minut) za celý rok.

### 3 Popis provedených prací

Cílem praktické části této práce je posouzení instalace FVE o výkonu 100 kWp umístěné na střeše haly z hlediska technického, ekonomického a ekologického.

Pro dosažení tohoto cíle bylo potřebné provést následující:

- Nastudování teoretických znalostí o:
  - fotovoltaické energii a jejím využití,
  - typech fotovoltaických panelů,
  - střídačích,
  - konstrukcích, na které, je možno fotovoltaické panely umístit.
- Vypočíst množství vyrobené elektrické energie pomocí několika výpočetních programech
- Porovnat výsledky z jednotlivých výpočtů

Pro provedení výpočtů byla navržena FVE s **orientací panelů na jih a sklonem 35°**.

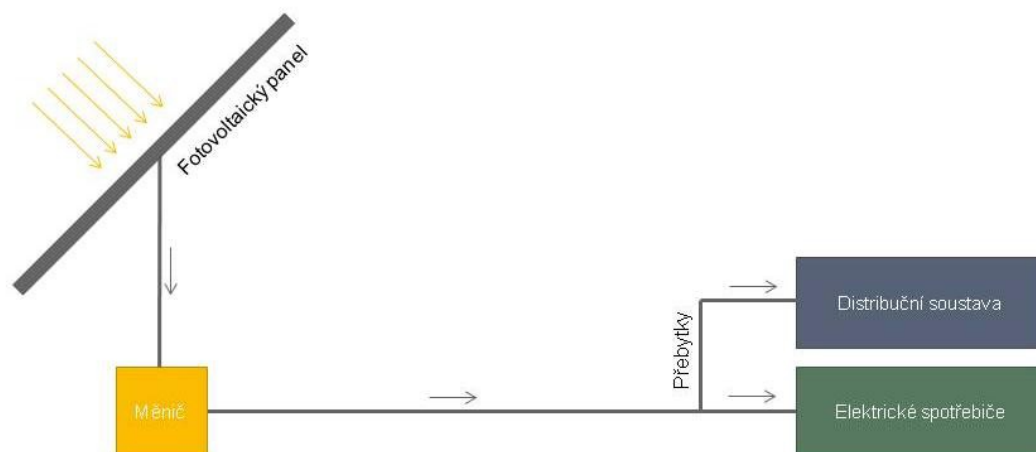
FVE se skládá z:

- fotovoltaických panelů
- vodičů
- měniče stejnosměrného proudu na střídavý, který je možno dodávat do sítě
- měření množství vyrobené energie.

Ekonomické hodnocení pak zahrnovalo variantu dodávku veškeré vyrobené energie do sítě a variantu maximálního odběru pro vlastní spotřebu s prodejem přebytků do sítě.

#### 3.1 Návrh FVE

Navržena byla jednoduchá FVE s prodejem veškeré vyrobené elektřiny do distribuční sítě nebo s co nejvyšší vlastní spotřebou. Schéma elektrárny je na následujícím obrázku:



**Obrázek 3.1 - Schéma systému pro řešení FVE s měničem**

## Výběr jednotlivých komponent FVE

### *Fotovoltaický panel*

S ohledem na instalaci panelů na střechu haly jsem vybral panely s vyšší účinností (monokrystalického křemíku) – viz. tab. 2.4 a přitom cenově dostupné - fotovoltaické panely firmy AEG.

AEG solární moduly spojují pokročilou technologii s vysokou spolehlivostí při výrobě. Plně černé AEG solární modul AS - M605 - 295 mají technologii PERC („Passivated Emitter Rear Cell“), která umožní získat více než 20% účinnosti navíc. Solární modul nabízí řadu výhod jako 10 let záruky na výrobek a záruku lineárního výkonu (97% po 25 letech provozu).

Celkový výkon FVE 100 kWp představuje instalaci **339 panelů AS - M605 – 295**. Ty jsou pak zapojeny do řad:

Počet paralelně zapojených řad modulů: 15 + 3

Počet sériově zapojených modulů v jedné řadě: 19 (u 15 řad) a 18 (u 3 řad)

### *Střídač*

Pro požadovaný výkon FVE jsem navrhl instalaci 3 střídačů od firmy ABB:

**2 x TRIO-27.6-TL-OUTD (ABB)**

MPP 1: 3 x 19 - MPP 2: 3 x 19

**1 x TRIO-27.6-TL-OUTD (ABB)**

MPP 1: 3 x 19 - MPP 2: 3 x 18



Pokud FVE veškerou svou vyrobenou elektřinu prodává do veřejné sítě, je její velikost omezena u instalací na budovy velikostí střechy s vhodnou orientací. V současné době však FVE nepobírají žádné finanční bonusy za vyrobenou elektřinu. Na výkup přebytků silové elektřiny z fotovoltaiky je však možno uzavřít smlouvu s libovolným obchodníkem za smluvní cenu. Cena výkupní elektřiny je však velmi nízká cca 500 Kč/MWh a zvyšuje se pouze v případě, že odběratel elektřiny je současně jejím dodavatelem do objektu – na cca 800-900 Kč/MWh (spotřeba objektu je vyšší, než výroba EE, přičemž cena nakupované elektřiny je násobně vyšší – jsou zde i poplatky za distribuci atd.).

V současné době je tedy ekonomicky nevýhodnější provádět dimenzování FVE tak, aby se většina elektřiny spotřebovala v objektu a přetok do sítě byl minimální.

Kromě ekonomického hlediska je v jednotlivých lokalitách důležité i hledisko technické, kdy příliš velké dodávky do sítě mohou způsobit její rozkolísání. Součástí povolení stavby je i vyjádření provozovatele přenosové sítě. Tento může v některých případech odběr do sítě zamítnout nebo jej omezit.

Správný návrh solárních systémů tak, aby produkovaly během roku co největší množství elektřiny při co nejnižších pořizovacích nákladech je tedy poměrně složitá záležitost. Do výpočtu solárních systémů vstupuje řada proměnných faktorů, především intenzita solárního záření v jednotlivých lokalitách v průběhu roku. Bez simulačního softwaru, který pracuje s těmito proměnnými daty, lze provést pouze velmi přibližný výpočet. Pokud ovšem chceme získat přesnější výsledky, je použití softwaru nezbytné.

Proto je při návrhu FVE důležité využít vhodného software pro výpočet výroby elektřiny. Dříve používané výpočty s měsíčním krokem jsou vhodné pouze pro orientační stanovení celkové výroby elektřiny z FVE. Výpočet se v současných verzích software provádí s krokem hodinovým nebo i kratším. To klade požadavky na vyčíslení stávající spotřeby objektu, kdy od dodavatele elektřiny je možno obdržet hodinová data o spotřebě nebo čtvrt hodinová maxima za období jednoho roku. Pokud tyto údaje nejsou k dispozici, je vhodné provést alespoň 14 denní měření spotřeby.

Rozdíly ve vypočtené výrobě elektřiny v jednotlivých programech jsou tedy způsobeny použitým krokem výpočtu a dále přesností použitých klimatických údajů, které jsou dány způsobem zpracování dostupných klimatických dat z jednotlivých měřících stanic a hustotou těchto stanic ve výpočtové databázi.

Pro srovnání výstupních výsledků jsem vybral **3 výpočetní programy** a u jednoho programu byl výpočet proveden s využitím dvou různých databází klimatických dat.

Pro výpočet jsem použil následující programy:

- 1) **PVGIS** - Fotovoltaický GIS (Photovoltaic Geographical Information System - PVGIS) [17]
- 2) **PV\*Sol** od německé společnosti Valentin software [18]
- 3) Program **Fotovoltaika** od společnosti DEKSOFT [19]

### 3.2 Program PVGIS - Fotovoltaický GIS

PVGIS je bezplatný online nástroj pro odhad výroby solární elektřiny fotovoltaického (PV) systému. Model byl vytvořený výzkumným centrem Evropské komise. Je zaměřený přímo na využití pro fotovoltaické aplikace, umožňuje kalkulaci výroby elektřiny v konkrétním místě kdekoli pro téměř celý svět, Amerika, Evropa, Asie a Afrika.

Tato aplikace počítá měsíční a roční potenciální výrobu elektřiny  $E$  [kWh] fotovoltaického systému s definovanými nakloněním a orientací modulů.

#### ***Klimatická data PVGIS-CMSAF***


Nová databáze v PVGIS byla vypočtena z údajů o slunečním záření, které jsou k dispozici v zařízení pro satelitní monitorování klimatu ( [CM-SAF](#)). Hodnoty slunečního záření byly odhadnuty ze satelitních snímků. Údaje jsou poměrně nedávné, od roku 1998 do poloviny roku 2010, takže by měly odrážet dopady změny klimatu. Využívání satelitních dat však má své vlastní problémy. Velikost pixelů v satelitních snímcích je asi 3-5 km, takže menší rysy, jako jsou úzká horská údolí, nelze vyřešit. Počítačový algoritmus, který počítá sluneční záření na zemi, může mít potíže s vysvětlením rozdílu

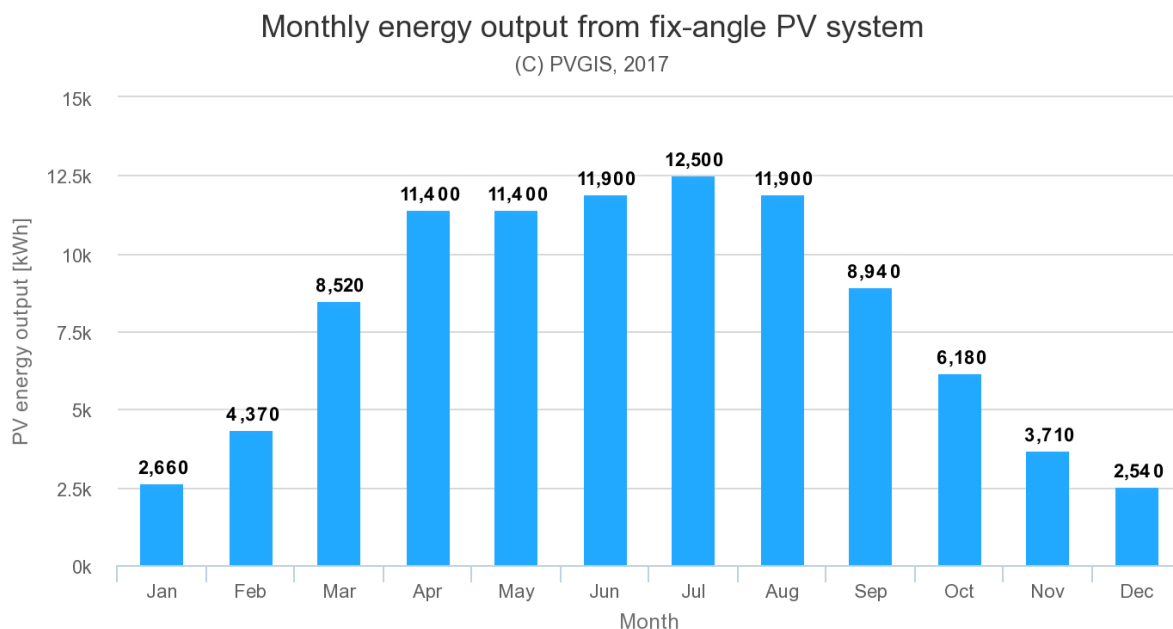
mezi sněhem a mraky, které mohou mít velký vliv na výsledek. Předběžný validační výpočet s použitím 18 stanic v Evropě ukázal, že standardní odchylka lokální chyby v ročním slunečním ozáření je asi 5%. Tímto způsobem máme data pro jakékoliv umístění na velkých geografických oblastech s hodinovým časovým rozlišením.

### **Výsledky výpočtu v programu PVGIS**

Výsledky výpočtu jsou přehledně uvedeny v následující tabulce a grafu.

**Tabulka 3.1 – Výroba elektřiny vypočtená programem PVGIS**

Summary	
	
<b>Provided inputs:</b>	
Location [Lat/Lon]:	49.809, 18.279
Horizon:	Calculated
Database used:	PVGIS-CMSAF
PV technology:	Crystalline silicon
PV installed [kWp]:	100
System loss [%]:	14
<b>Simulation outputs:</b>	
Slope angle [°]:	35
Azimuth angle [°]:	0
Yearly PV energy production [kWh]:	96100
Yearly in-plane irradiation [kWh/m <sup>2</sup> ]:	1240
Year to year variability [kWh]:	5320.00
Changes in output due to:	
Angle of incidence [%]:	-3
Spectral effects [%]:	1.7
Temperature and low irradiance [%]:	-8.9
Total loss [%]:	-22.7



**Obrázek 3.2 – Graf měsíční výroby elektřiny vypočtený v PVGIS**

### 3.3 Program PV\*SOL

Program je dodáván ve třech úrovních:

- 1) **PV\*SOL Express** (nové označení "basic") – umožňuje jednoduše a rychle určit počet panelů pro fotovoltaické pole nebo pro jednotlivou střechu budovy a dále automaticky či manuálně nastavit konfiguraci až pro tři různé typy měničů a kontroluje vhodnost kombinace panelů a měničů. Slouží k simulování fotovoltaického systému až do výše výkonu 100 kWp.
- 2) **PV\*SOL Pro** (nové označení "advanced")
- 3) **PV\*SOL Expert** (nové označení "premium")

Dva poslední programy umí simulovat fotovoltaické systémy až do počtu 6 polí, každé pole může mít až 65 000 panelů. Programy kalkulují též regulace evropských energetických společností, i veškeré fyzikální parametry, které ovlivňují výpočetní model nebo které by mohly způsobit nižší produkci. Oba programy umožňují vytvoření jednoduché analýzy stínění pro každé FVE pole. Je možné také do programu importovat údaje potřebné pro simulaci horizontu z příslušných programů.

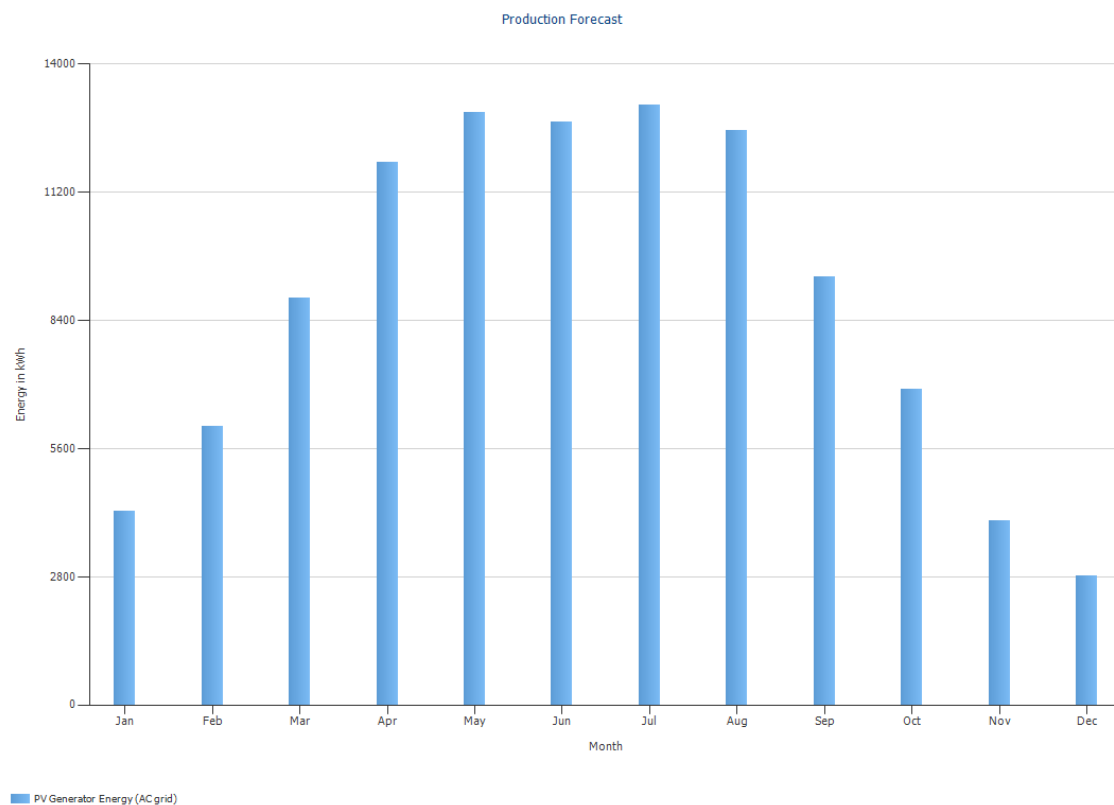
## Klimatická data

Všechny tři verze programu umožňují přístup prakticky ke všem klimatickým záznamům. K dispozici jsou data z 8 000 meteorologických stanic po celém světě. V databázi komponent fotovoltaických systémů jsou údaje o více jak 4 500 typech fotovoltaických panelů od více než 200 výrobců a okolo 1000 typů měničů od cca 50 různých výrobců.

## Tabulka 3.2 – Výroba elektřina vypočtená programem PV\*SOL

### Výsledky výpočtu v programu PV\*SOL Premium

<b>Global radiation - horizontal</b>	<b>1 080,75 kWh/m<sup>2</sup></b>	
Deviation from standard spectrum	-10,81 kWh/m <sup>2</sup>	-1,00 %
Ground Reflection (Albedo)	19,35 kWh/m <sup>2</sup>	1,81 %
Orientation and inclination of the module surface	136,05 kWh/m <sup>2</sup>	12,49 %
Shading	0,00 kWh/m <sup>2</sup>	0,00 %
Reflection on the Module Interface	-52,41 kWh/m <sup>2</sup>	-4,28 %
<b>Global Radiation at the Module</b>	<b>1 172,94 kWh/m<sup>2</sup></b>	
	1 172,94 kWh/m <sup>2</sup>	
	x 551,51 m <sup>2</sup>	
	= 646 892,11 kWh	
<b>Global PV Radiation</b>	<b>646 892,11 kWh</b>	
Soiling	0,00 kWh	0,00 %
STC Conversion (Rated Efficiency of Module 18,14 %)	-529 576,11 kWh	-81,86 %
<b>Rated PV Energy</b>	<b>117 316,00 kWh</b>	
Low-light performance	-3 501,99 kWh	-2,99 %
Deviation from the nominal module temperature	-2 418,50 kWh	-2,12 %
Diodes	-556,98 kWh	-0,50 %
Mismatch (Manufacturer Information)	-2 216,77 kWh	-2,00 %
Mismatch (Configuration/Shading)	0,00 kWh	0,00 %
<b>PV Energy (DC) without inverter down-regulation</b>	<b>108 621,75 kWh</b>	
Failing to reach the DC start output	-8,55 kWh	-0,01 %
Down-regulation on account of the MPP Voltage Range	0,00 kWh	0,00 %
Down-regulation on account of the max. DC Current	0,00 kWh	0,00 %
Down-regulation on account of the max. DC Power	0,00 kWh	0,00 %
Down-regulation on account of the max. AC Power/cos phi	-150,41 kWh	-0,14 %
MPP Matching	-108,46 kWh	-0,10 %
<b>PV energy (DC)</b>	<b>108 354,33 kWh</b>	
<b>Energy at the Inverter Input</b>	<b>108 354,33 kWh</b>	
Input voltage deviates from rated voltage	-230,92 kWh	-0,21 %
DC/AC Conversion	-2 643,28 kWh	-2,44 %
Standby Consumption (Inverter)	-44,59 kWh	-0,04 %
Total Cable Losses	0,00 kWh	0,00 %
<b>PV energy (AC) minus standby use</b>	<b>105 435,55 kWh</b>	
<b>Grid Feed-in</b>	<b>105 480,14 kWh</b>	



**Obrázek 3.3 – Graf měsíční výroby elektřiny vypočtený v PV\*SOL**

### 3.4 Program DEKSOFT FVE (Fotovoltaika)

DEKSOFT FVE je komerční specializovaný program pro výpočet produkované elektrické energie fotovoltaický systémem od české společnosti. Program splňuje podmínky pro použití pro dotační program Nová zelená úsporám. V aktuální verzi jsou podporovány systémy:

- FVE s měničem napojená na distribuční soustavu
- FVE s měničem a bateriemi napojená na distribuční soustavu
- FVE s měničem a akumulací přebytků do teplé vody
- FVE určená výhradně pro ohřev TV

#### ***Hlavní vlastnosti programu:***

- Výpočtový krok 10 minut
- Provázání s programem [NZÚ](#)
- Uživatelsky volitelná podrobnost zadání profilu spotřeby elektrické energie a účinnosti jednotlivých prvků
- Možnost zadání zastínění FV panelů pomocí 3D modelu v programu [3D Editor](#)
- Podrobné zobrazení výsledků pomocí aplikace DesignBuilder Results Viewer
- Podrobný výpočet akumulace energie do teplé vody umožňující optimalizaci návrh pro dva případy technického řešení (bivalentní zásobník, dva samostatné zásobníky)

#### ***Klimatická data***

Jsou zde údaje z klimatických dat na území ČR a SR. V současné verzi jsou k dispozici dva zdroje dat:

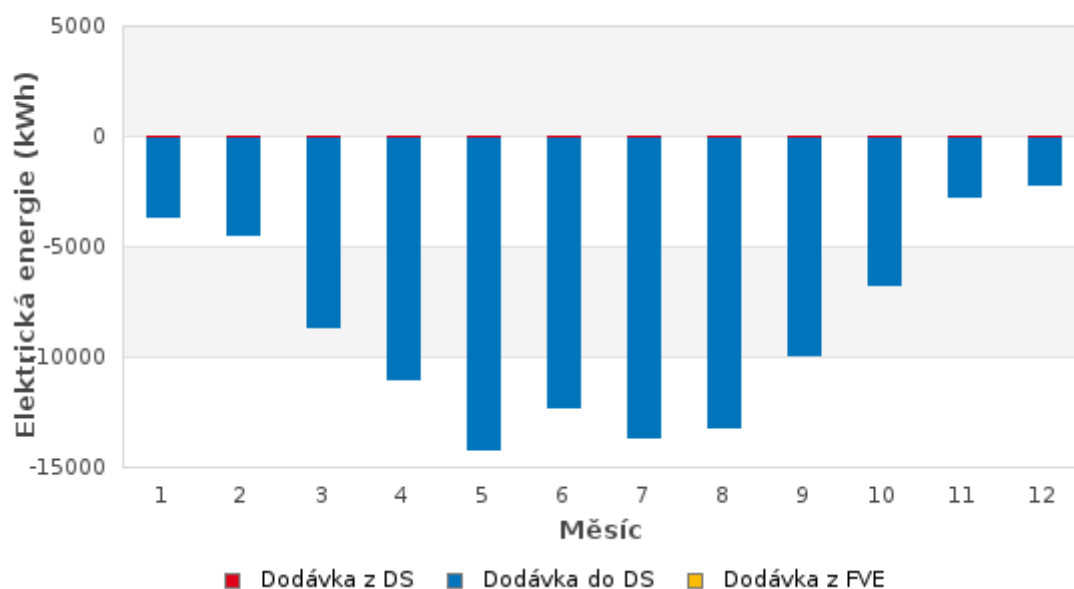
- a) Databáze IWEK (International Weather for Energy Calculations). Jedná se o hodinová data stanovaná statistickými metodami na základě dlouhodobých měření.
- b) Referenční klimatický rok dle ČHMI.

Pro výpočet jsem se rozhodl použít oba zdroje klimatických dat a provést porovnání dosažených výsledků.

**Výsledky výpočtu v programu DEKSOFT FVE – databáze IWEK**

**Tabulka 3.3 – Výroba elektřiny vypočtená programem FVE - IWEK**

Celková spotřeba elektrické energie	13,8	kWh
Celková využitelná produkce elektrické energie z FVE v budově	3,7	kWh
Celková produkce elektrické energie dodaná do distribuční soustavy	102 494,9	kWh
Celková produkce elektrické energie z FVE	102 498,6	kWh
Celkové množství elektrické energie odebrané z distribuční soustavy	10,1	kWh
Procento využití celkové produkce FVE pro krytí spotřeby v budově	0,0	%
Procento pokrytí vlastní spotřeby pomocí FVE	26,8	%



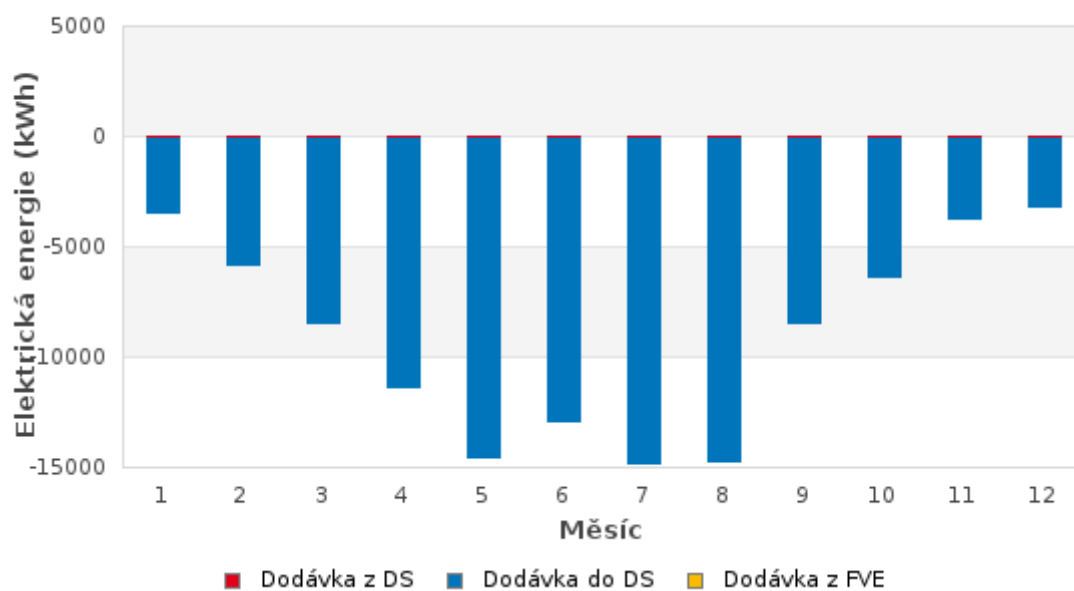
**Obrázek 3.4 – Graf měsíční výroby elektřiny vypočtený v FVE - IWEK**



**Výsledky výpočtu v programu DEKSOFT FVE – databáze ČHMI**

**Tabulka 3.4 – Výroba elektřiny vypočtená programem FVE - CHMI**

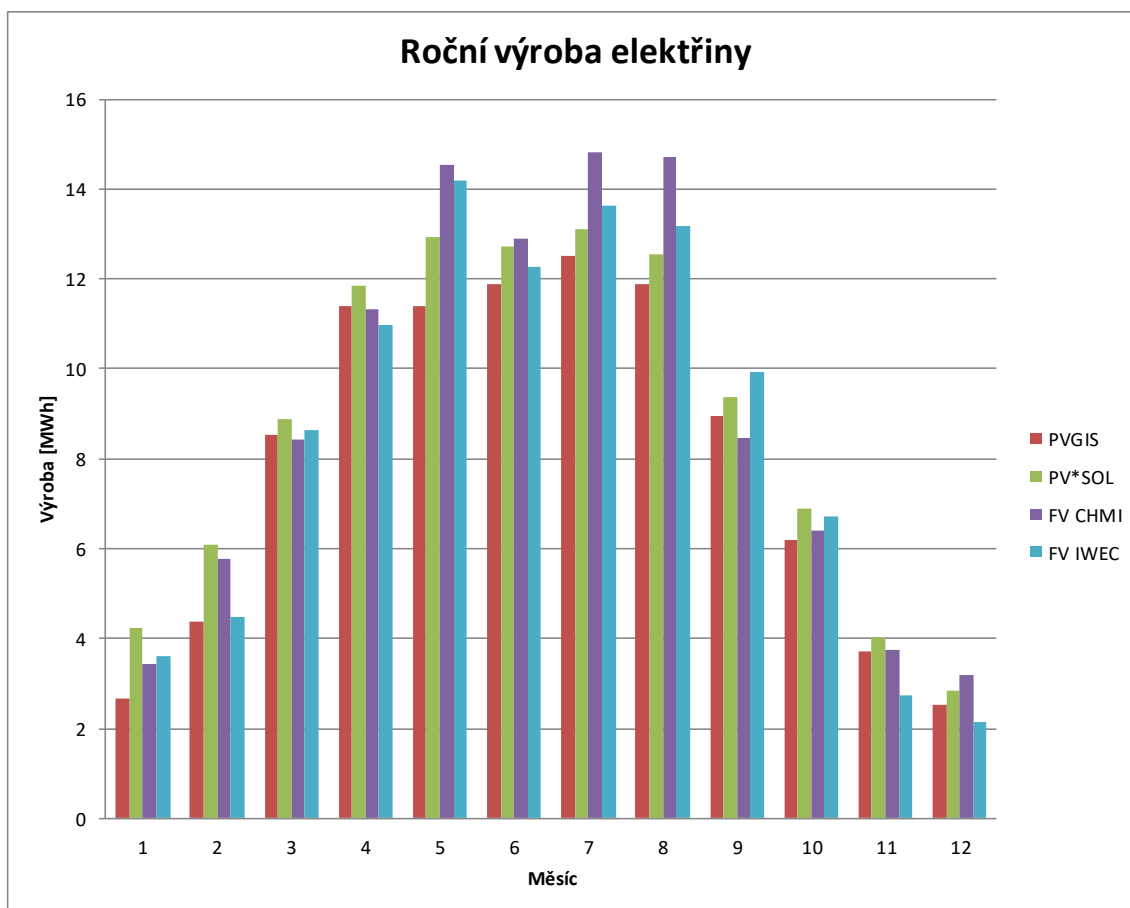
Celková spotřeba elektrické energie	13,8	kWh
Celková spotřeba elektrické energie	14,0	kWh
Celková využitelná produkce elektrické energie z FVE v budově	3,5	kWh
Celková produkce elektrické energie dodaná do distribuční soustavy	107 689,9	kWh
Celková produkce elektrické energie z FVE	107 693,4	kWh
Celkové množství elektrické energie odebrané z distribuční soustavy	10,5	kWh
Procento využití celkové produkce FVE pro krytí spotřeby v budově	0,0	%



**Obrázek 3.5 - Graf měsíční výroby elektřiny vypočtený FVE - CHMI**

## 4 Porovnání a zhodnocení vypočtených hodnot

Výroba elektřiny v jednotlivých měsících je znázorněna v následujícím grafu:



**Obrázek 4.1 – Graf výroby elektřiny v jednotlivých měsících**

Z grafu je patrné, že výpočty v PVGIS vycházejí téměř ve všech měsících nejnižší. Využití těchto nízkých hodnot pro hodnocení navržené FVE je možno použít pro elektrárnu s celou dodávkou do sítě nebo pro ostrovní elektrárnu. Pro elektrárnu s výrobou převážně pro vlastní spotřebu však může dojít k tomu, že na základě těchto výsledků navržený výkon je předimenzovaný a dojde k navýšení podílu elektřiny dodávané do sítě. Tato skutečnost pak zhorší ekonomickou návratnost navržené FVE oproti výpočtovému očekávání – viz kapitola ekonomické hodnocení.

Cílem PVGIS je tedy získat rychlý přehled o FV potenciálu ve zvolené lokalitě a pro malé systémy do 10 kWp je to pravděpodobně dostačující.

Pro FVE větších výkonů je vhodnější použít výpočetní programy pracující především s klimatickými údaji v dané lokalitě a s ohledem na měnící se klimatické podmínky pracovat s daty s posledních 10 – 15 let.

V programu DEKSOFT FVE bylo možno srovnat vliv meteorologických dat na výsledek výpočtu. Databáze IWEK má data z delšího období a zahrnuje i údaje z konce 20. století. U databáze ČHMI je použit tzv. „typický rok“ odrážející údaje za posledních 15 let. Z porovnání výsledků je patrné, že výrazně vyšší hodnoty výroby elektřiny jsou u dat CHMI v letních měsících, což odpovídá trendu posledních let – suchých a teplých letních měsíců.

Program PV\*SOL poskytuje výrazně vyšší hodnoty výroby v prvních třech měsících. Pro vysvětlení příčiny tohoto stavu by bylo nutno provést podrobnou analýzu klimatických dat, nebo provést srovnání skutečné výroby s vypočtenými hodnotami s několika posledních let. Toto je však nad rámec možností této bakalářské práce.

Celkově je roční hodnota z programu PV\*SOL mezi hodnotami obdržеныmi z programu DEKSOFT FVE a více se přibližují údajům obdržеныm z databáze CHMI. Rozdíl je cca 2%, což je dobrá shoda mezi těmito programy.

## 5 Ekonomické vyhodnocení

Výpočet ekonomického vyhodnocení se provádí podle těchto kritérií :

- a. Čistá současná hodnota (NPV):

$$NPV = \sum_{t=1}^{T_{\bar{z}}} CF_t (1 + r)^{-t} - IN \quad (\text{tis.Kč})$$

kde  $T_{\bar{z}}$  - doba životnosti (hodnocení) projektu

- b. Vnitřní výnosové procento (IRR):

Hodnota IRR se vypočte z podmínky

$$\sum_{t=1}^{T_{\bar{z}}} CF_t (1 + IRR)^{-t} - IN = 0 \quad (\%)$$

- c. Reálná doba návratnosti, doba splacení investice při uvažování diskontní sazby  $T_{sd}$  se vypočte z podmínky:

$$\sum_{t=1}^{T_{sd}} CF_t (1 + r)^{-t} - IN = 0 \quad (\text{roky})$$

kde

$CF_t$  - roční přínosy projektu (změna peněžních toků po realizaci projektu)

$r$  - diskont

$(1 + r)^t$  - odúročitel

$IN$  - investiční výdaje projektu

Vypočtená roční výroba elektřiny pomocí jednotlivých programů je uvedena v následující tabulce:

**Tabulka 5.1 – Výroba elektřina vypočtená jednotlivými programy**

Program	Výroba elektřiny
	[kWh/rok]
PVGIS	96 020
PV*SOL	105 480
FV CHMI	107 693
FV IWEK	102 499

Pro hodnocení jsem vybral hodnotu z programu PV\*SOL, která představuje kompromis mezi hodnotami z programu Fotovoltaika.

Investiční náklady jsem stanovil zjednodušeným výpočtem, který je uveden v následující tabulce:

**Tabulka 5.2 - Investiční výdaje projektu**

Název	Mj	Počet	Materiál	Materiál celkem	Montáž	Montáž celkem	Cena celkem
<b>Elektromontáže</b>							
<b>Fotovoltaické panely a konstrukce</b>							
Fotovoltaický panel 295WP MONO	ks	339,00	3 366,83	1 141 355,37	650,00	220 350,00	1 361 705,37
Samozátěžová konstrukce	ks	339,00	1 170,00	396 630,00	1 080,00	366 120,00	762 750,00
Kabely, trubky, propojky, závaží	soub.	1,00	172 000,00	172 000,00	85 000,00	85 000,00	257 000,00
<b>Fotovoltaické panely a konstrukce - celkem</b>				<b>1 709 985,37</b>		<b>671 470,00</b>	<b>2 381 455,37</b>
							0,00
<b>Střídače, rozvaděče, kabeláž</b>							
Rozvaděč FV systému	ks	1,00	99 800,00	99 800,00	22 000,00	22 000,00	121 800,00
Střídač Trio-27.6.-TL-OUTD-S2X-400	ks	3,00	84 750,00	254 250,00	3 500,00	10 500,00	264 750,00
Kabely, trubky, drobný mat.	soub.	1,00	36 000,00	36 000,00	3 500,00	3 500,00	39 500,00
<b>Střídače, rozvaděče, kabeláž - celkem</b>				<b>390 050,00</b>		<b>36 000,00</b>	<b>426 050,00</b>
							0,00
Projektová dokumentace	ks	1,00	15 000,00	15 000,00	0,00	0,00	15 000,00
Revize	ks	1,00	5 500,00	5 500,00	0,00	0,00	5 500,00
							0,00
<b>Elektromontáže - celkem</b>				<b>2 120 535,37</b>		<b>707 470,00</b>	<b>2 828 005,37</b>

Měrné investiční náklady vychází na 28,28 tis. Kč/kWp. Tuto hodnotu považuji za přijatelnou (maximální měrné investiční náklady pro stávající dotační programy jsou 30 tis.Kč/kWp).

V současné době FVE nepobírají žádné finanční bonusy za vyrobenou elektřinu. Cena výkupní elektřiny je velmi nízká cca 500 Kč/MWh a zvyšuje se pouze v případě, že odběratel elektřiny je současně jejím dodavatelem do objektu – na cca 800-900 Kč/MWh (spotřeba objektu je vyšší, než výroba EE, přičemž cena nakupované elektřiny je násobně vyšší – jsou zde i poplatky za distribuci atd.).

Tyto skutečnosti jsem zohlednil při ekonomickém hodnocení instalace FVE.

Pro hodnocení jsem vytvořil 3 varianty spotřeby elektrické energie:

**Varianta 1** – veškerá vyrobená elektřina je prodána do distribuční sítě

**Varianta 2** – 50% vyrobené elektřiny je dodáno do distribuční sítě a 50% je použito pro vlastní spotřebu.

**Varianta 3** – 10% vyrobené elektřiny je dodáno do distribuční sítě a 90% je použito pro vlastní spotřebu.

Poznámka: Využití 100 % vyrobené elektřiny pro vlastní spotřebu je bez dalších investičních opatření nemožné, jde např. o instalaci bateriového úložiště, nebo při vysoké technologické spotřebě teplé vody během celého roku pro její ohřev (přímý nebo pomocí tepelného čerpadla).

Pro vyhodnocení jsem použil následující ceny elektrické energie:

- 500 Kč/MWh pro dodávku veškeré vyrobené elektřiny do sítě
- 800 Kč/MWh pro dodávku elektřiny do sítě při společném odběru elektřiny ze sítě
- 2800 Kč/MWh pro odběr elektřiny do sítě (jedná se zde o přínos za neodebranou elektřinu)

Veškeré ceny a náklady ve výpočtech jsou uváděny bez DPH.

Z ekonomického hodnocení vyplývá (viz. tab. 5.3 na následující stránce), že při stávajících legislativních podmínkách (bez podpory výkupu elektřiny z FVE) se její instalace vyplatí pouze v případě, že využijeme více než 90 % vyrobené elektřiny pro vlastní spotřebu.

Při nižším využití elektřiny pro okamžitou vlastní spotřebu se instalace ekonomicky vyplatí pouze s dotační podporou pro výstavbu FVE (např. program OP PIK nebo Nová zelená úsporám).

**Tabulka 5.3 - Ekonomické vyhodnocení**

Význam	Symbol	1. varianta	2. varianta	3. varianta	Jednotka
Investiční výdaje projektu	IN	2 828,0	2 828,0	2 828,0	tis. Kč
Úspora energie	-	380	380	380	GJ
Změna nákladů na energii	-	0,0	147,7	265,8	tis. Kč
Změna tržeb (za elektřinu)	-	52,7	42,2	8,4	tis. Kč
Přínos projektu celkem	CF	52,7	189,9	274,2	tis. Kč
Doba hodnocení	-	20,0	20,0	20,0	roky
Diskont	r	4,0%	4,0%	4,0%	-
$\sum_{t=1}^{20} \frac{CF_t}{(1+r)^t}$	-	716,8	2 580,3	3 612,4	tis. Kč
Prostá doba návratnosti	$T_s$	53,6	14,9	10,3	roky
Reálná doba návratnosti	$T_{sd}$	> T <sub>ž</sub>	23,1	14,1	roky
Čistá současná hodnota	NPV	-2 111,3	-247,7	784,4	tis. Kč
Vnitřní výnosové procento	IRR	-7,98%	2,99%	3,31%	-
<b>Projekt je :</b>	-	<b>ztrátový</b>	<b>ztrátový</b>	<b>ziskový</b>	-

## 6 Ekologické vyhodnocení

Elektřina z FVE je vyráběna pomocí fotovoltaických panelů (ze slunce). Tato elektřina tedy nemusí být dodána z klasických elektráren spalujících fosilní paliva – dojde tedy ke snížení produkce škodlivých látek a především CO<sub>2</sub>. Hodnoty dopadu na životní prostředí jsou uvedeny v následující tabulce. Ve vyhodnocení jsou vzaty emisní limity dle podkladů Vyhlášky 309/2016 Sb a směrnic OPŽP. Ekologické vyhodnocení je provedeno v souladu se zákony č. 17/ 1992 Sb. o životním prostředí a č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší.

**Tabulka 6.1 - Environmentální vyhodnocení – zatížení životního prostředí**

Parametr	Výchozí stav	Po realizaci	Rozdíl
	t/rok	t/rok	t/rok
Tuhé znečišťující látky (TZL)	0,0039	0,0000	0,0039
PM <sub>10</sub>	0,0033	0,0000	0,0033
PM <sub>2,5</sub>	0,0021	0,0000	0,0021
SO <sub>2</sub>	0,0887	0,0000	0,0887
NO <sub>x</sub>	0,0599	0,0000	0,0599
VOC	0,0003	0,0000	0,0003
CO <sub>2</sub>	106,70	0,00	106,70

Z výsledků vyplývá výrazná úspora emisí CO<sub>2</sub>. Tato úspora je však v současnosti podmíněna poměrně vysokými investičními náklady a dlouhou dobou návratnosti.



## 7 Závěr

Cílem mé bakalářské práce bylo provést analýzu perspektivy využívání fotovoltaiky v České republice pomocí realizace fiktivní FVE 100 kWp.

Pro návrh FVE 100 kWp jsem po rozboru současné legislativy vybral střešní instalaci na střechu hypotetické výrobní haly s orientací panelů na jih a sklonem 35°. Pro realizaci jsem navrhl fotovoltaické panely z monokrystalického křemíku, které dosahují nejvyšší účinnosti a mají přijatelné náklady. Toto řešení jsem zvolil s ohledem na velikost a zatížení střechy haly.

Výpočet výroby elektřiny z FVE jsem provedl třemi SW výpočetními nástroji a provedl porovnání obdržených výsledků. Volně přístupný program PVGIS je jednoduchý na zadávání, ale poskytuje výrazně nižší hodnoty, než ostatní programy. Částečně je to i dáno klimatickými daty, které pocházejí ze satelitního sledování a mají vyšší odchylku od skutečnosti. Tento program je vhodný především pro rychlé orientační hodnocení FVE a to především malých výkonů. Tento program neumožňuje detailní porovnávání okamžité výroby a spotřeby elektřiny.

Další použité programy jsou již na komerční bázi a umožňují mnohem detailnější zadávání jednotlivých komponent FVE, mají možnost zohlednit zastínění okolní zástavbou a vegetací a umožňují zadat detailní spotřebu elektřiny v objektu v libovolném intervalu (výpočetní krok programu DESOFT FVE je 10 minut). Program PV\*SOL disponuje rozsáhlejší databází komponent FVE, zahraničními databázemi klimatických dat a je zaměřen více na projektanty. Program DESOFT FVE je zaměřen na Českou a Slovenskou republiku, databáze výrobků je užší a odpovídá dostupnosti těchto komponent na našem trhu. Výstupní formuláře z tohoto programu lze využít jako přílohy k dotačním programům. Vypočtené výsledky programu PV\*SOL a DEKSOFT FVE s daty ČHMI jsou srovnatelné – rozdíl je 2%. K výpočtům výroby elektřiny z FVE doporučuji použití obou těchto programů.

Z ekonomického hlediska je s ohledem na stávající legislativu výstavba větších FVE problematická. Výstavba pouze pro dodávku elektřiny do sítě nemá žádný ekonomický význam. Jedinou možností je realizace FVE na střechu objektu, kde téměř veškerá

vyrobená elektřina je použita pro vlastní spotřebu. Návratnost této varianty je však na hranici, kdy je možno pro ní žádat o úvěr. Nejschůdnější cestou je využít dotační podporu státu, např. dotační program OP PIK, který návratnost projektu sníží na cca polovinu. S výraznějším rozšířením FVE v budoucnu lze počítat pouze v případě snížení nákladů na jednotkový výkon fotovoltaického panelu a to snížením ceny stávajících panelů nebo zavedením výroby panelů s výrazně vyšší účinností. Rozšíření FVE rovněž ovlivní výrazné zlevnění bateriových uložišť a větší rozvoj elektromobility.

## 8 Seznam použitých zdrojů

- [1] Karamanoliš, Strakatis : Sluneční energie východisko z ekologicko-energetické krize, Praha: Sdružení MAC, s.r.o., 1996
- [2] Cihelka J.: Solární tepelná technika, Praha: T. Malina, 1994
- [3] Kleczek J.: Sluneční energie - úvod do helioenergetiky, Praha: SNTL, 1981
- [4] *Teorie fotovoltaiky* [online].  
Dostupný z WWW: <<http://www.isofenenergy.cz/fotovoltaika.aspx>>
- [5] *Fotovoltaika sluneční záření v ČR* [online]. Dostupný z WWW: <  
<http://www.isofenenergy.cz/Slunecni-zareni-v-CR.aspx>>
- [6] Atlas podnebí České republiky[online][. Dostupný z WWW: <  
<http://old.chmi.cz/meteo/ok/atlas/uvod.html> >
- [7] HASELHUHN, Ralf. Fotovoltaika: budovy jako zdroj proudu. 1. české vyd. Ostrava: HEL, 2011, 176 s. ISBN 978-80-86167-33-6.
- [8] SOLPOWER, [online]. 2011. Dostupné na WWW: <http://www.solpowerag.com/>
- [9] JAK JE TO S POVINNOSTÍ RECYKLACE FV PANELŮ? [Online]. In: Novatrix. Dostupné z: <http://www.novatrix.cz/fag/jak-je-to-s-povinnosti-recyklace-fv-panelu-42-131.htm>.
- [10] Česká republika. zákon č. 96/2014 Sb. [Online], Dostupné z: <http://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/ViewFile.aspx?type=c&id=6719>.
- [11] SOLARENVI, [online]. Dostupné na WWW: <http://solarenavi.cz>
- [12] Wikipedie, [online].
- [13] M.Libra, V. Poulek. *Fotovoltaika: Teorie i praxe využití solární energie*. Praha : ILSA, 2010. ISBN: 978-80-904311-5-7.
- [14] T. Matuška: Zjednodušený bilanční výpočet ročních přínosů fotovoltaických instalací, Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/13878-zjednodusený-bilancni-vypocet-rocnich-prinosu-fotovoltaickych-instalaci>

- [15] ČSN EN 15316-4-6 Tepelné soustavy v budovách – Výpočtová metoda pro stanovení energetických potřeb a účinností soustavy – Část 4-6: Výroba tepla, fotovoltaické soustavy. ÚNMZ 2014.
- [16] TNI 73 0331 Energetická náročnost budov – Typické hodnoty pro výpočet. ÚNMZ 2013.
- [17] Program PVGIS - webová služba dostupná na [www:](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php)  
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>
- [18] Program PV\*SOL. Dostupný z [www:](https://www.valentin-software.com/) <https://www.valentin-software.com/>
- [19] Program DEKSOFT FVE. Dostupný z [www:](https://deksoft.eu/programy/index) <https://deksoft.eu/programy/index>

## **9 Seznam příloh**

Příloha 1 – Výkres: Rozmístění panelů na střeše, pouze v elektronické podobě (1 strana).

Příloha 2 - Výkres: Zapojení FVE 1, pouze v elektronické podobě (1 strana).

Příloha 3 - Výkres: Zapojení FVE 2, pouze v elektronické podobě (1 strana).